Aus der Poliklinik und Klinik für Zahn-, Mund- und
Kieferkrankheiten der Freien Universität Berlin
Direktor: Professor Dr. Dr. Ewald Harndt

DIE INTENSITÄTSSCHWELLE FÜR VIBRATIONEN AM MENSCHLICHEN ZAHN

INAUGURAL-DISSERTATION
zur
Erlangung der zahnmedizinischen Doktorwürde
an der
Medizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin

vorgelegt von
Joachim Viohl
aus Berlin

1961

Druck:

Ernst - Reuter - Gesellschaft
der Förderer und Freunde der Freien Universität e.V.

Dissertations - Druckstelle

Berlin-Dahlem, Garystr. 45, Tel.: 76 52 61, App. 668

Aus der Poliklinik und Klinik für Zahn-, Mund- und
Kieferkrankheiten der Freien Universität Berlin
Direktor: Professor Dr. Dr. Ewald Harndt

DIE INTENSITÄTSSCHWELLE FÜR VIBRATIONEN AM MENSCHLICHEN ZAHN

INAUGURAL-DISSERTATION
zur
Erlangung der zahnmedizinischen Doktorwürde
an der
Medizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin

vorgelegt von
Joachim Viohl
aus Berlin

Dekan: Professor Dr. med. Helmut Selbach

Referent: Professor Dr. med., Dr. med. dent.
Ewald Harndt

Korreferent: Professor Dr. med., Dr. med. vet. h. c.
Max-Heinrich Fischer

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Freien Universität Berlin

Promoviert am: 27. Juli 1961

Meinen Eltern gewidmet

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546826_0051

Inhaltsverzeichnis

A Einleitung. Entwicklung auf dem Gebiet des Bohrens und Schleifens 7

B Hauptteil

I. Literaturdurchsicht

a) Physik 9
1. Physik der mechanischen Schwingungen 9
2. Der Zahn als schwingungsfähiger Körper 9
3. Amplituden und Frequenzen, die beim Bohren und Schleifen auftreten 10
b) Physiologie 12
1. Allgemeiner Überblick 12
2. Sinnesphysiologie 14
α) Reizung 14
β) Antransport 14
γ) Rezeptor 15
δ) Erregungsimpulse 16
3. Schwellen und Frequenzgrenzen 17
4. Verdeckung durch Schalleindrücke 19

II. Eigene Untersuchungen

a) Versuchsaufbau 20
1. Schwingungserreger 20
2. Vorkraft 23
3. Meßdose 23
4. Übrige Geräte 23
b) Versuchsdurchführung 25
c) Versuchspersonen 27
d) Versuchsergebnisse 27
1. Allgemeine Angaben 27
2. Meßergebnisse 27
e) Auswertung der Meßergebnisse 36
1. Gleichwertigkeit der Einzelmessungen 36

2. Auswertung für einen Zahn 38
3. Einfluß der Konzentration 39
4. Wiederholungsmessungen 41
5. Verschiedene Vorkräfte 42
6. Zusammenfassung der Wechselkraftmessungen an +1 und 1+ 43
7. Schwingwege 45
8. Zusammenfassung der Schwingwegmessungen an +1 und 1+ 47
9. Untersuchungen an anderen Zähnen 48
10. Schwellenbestimmung an 4 Frontzähnen einer Versuchsperson 49

III. Diskussion

a) Korrektur des 700 Hz Gipfel der Wechselkraftschwelle . . 50
b) Streuung der Meßergebnisse 50
c) Einfluß des Gehörs 51
d) Vergleiche mit
1. Schwellenbestimmungen an anderen Reizorten 52
2. Bestimmungen der oberen Frequenzgrenze an Zähnen 53
3. Schwingwegen des Zahnes beim Bohren und Schleifen 53
e) Zentrale Verarbeitung 54
d) Klinische Hinweise 55

C Zusammenfassung 55

D Tabellenanhang 57

E Literaturverzeichnis 65

A Die Entwicklung des Bohrens und Schleifens

Die Entwicklung auf dem Gebiet des Bohrens und Schleifens von Zahnhartsubstanzen ist durch die Einführung hoher und höchster Umdrehungszahlen in den letzten Jahren rasch vorangekommen, und die neuen Geräte haben sich in der zahnärztlichen Praxis schnell eingeführt. Das Präparieren der Zähne nimmt weniger Zeit in Anspruch und ist für den Patienten weniger unangenehm. Gleichzeitig wurde aber eine Reihe neuer Fragen aufgeworfen. Die normalen Hand- und Winkelstücke laufen in ihren Lagern in wenigen Minuten heiß. Es sind neue entsprechende Hand- und Winkelstücke sowie Pflegegeräte geschaffen worden. Als Folge der hohen Drehzahlen entstehen durch die Reibung am Zahn große Wärmemengen mit hohen Temperaturen. Wenn nicht mit Wasser gekühlt wird, entstehen Hitzesprünge und das Dentin verbrennt. Trotz der Kühlung mit einer Sprayeinrichtung können Temperaturschädigungen der Pulpa eintreten, wenn man mit dem Bohrer oder Schleifinstrument die Zahnhartsubstanz zu lange an einer Stelle bearbeitet. Deswegen soll "tupfend" gebohrt werden. Die Bohr- und Schleifleistung ist in Versuchen, abhängig von Druck, Umdrehungszahl, Bohr- und Schleifinstrument, Trocken- und Naßschliff, untersucht worden. Warum das Bohren und Schleifen bei höheren Drehzahlen weniger schmerzhaft ist, läßt sich bisher nicht eindeutig erklären. Die Ursachen der bei der mechanischen Bearbeitung des Zahnes auftretenden Schmerzen werden in Druck-, Vibrations- und Temperaturreize zerlegt (1). Daß die Berührung freiliegenden Dentins, ein Druckreiz, Schmerzen verursachen kann, ist bekannt (freiliegende Zahnhälse, Sondieren präparierter Kavitäten). Von den Temperaturreizen weiß man, daß zu heiß in die Kavität eingebrachte Guttapercha, Kohlensäureschnee bei der Vitalitätsprüfung der Pulpa, der nicht temperierte Wasser- oder Luftstrahl zur Kavitätensäuberung Schmerzen bereiten können. Die Vibrationen als Schmerzursache sind wenig untersucht. Während das Forschungsgebiet der Vibrationen in der Physiologie ausführlich bearbeitet ist, weiß man auf dem speziellen Gebiet der Zahnheilkunde noch nichts Umfassendes. An Einzelheiten sind bekannt, daß Vibrationen auftreten, welche Amplituden beim Bohren und Schleifen erzeugt werden und daß eine obere Frequenzgrenze gefunden wurde. Unbekannt ist die Intensitätsschwelle bei Vibrationen an den Zähnen. Sie soll in dieser Arbeit gefunden und näher untersucht werden, um zu zeigen, wie stark Vibrationen sein müssen, damit sie empfunden werden.

Bei Vibrationsuntersuchungen sind verschiedene Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Die Physik als Grundwissenschaft liefert die Voraussetzungen. Es interessiert das Gebiet der mechanischen Schwingungen. Der Ausdruck "Schwingung", der in der Physik allgemein angewendet wird, ist gleichbedeutend mit "Vibration". In der Medizin, vielleicht beeinflußt durch das angelsächsische Schrifttum, ist der Ausdruck "Vibration" vorwiegend üblich. Dabei umfaßt er z. T. mehr: Oft ist noch die Sinneserregung, das Vibrationsempfinden mit in den Begriff einbezogen. Die Sinnesphysiologie ist als zweiter Gesichtspunkt anzuführen. Es ist zu klären, wie Vibrationen vom menschlichen Körper

verarbeitet werden. Außerdem sind die Physik und Physiologie der Vibrationen unter dem speziellen Gesichtspunkt der Zahnheilkunde zu betrachten, wobei festzustellen ist, wann, wo und wie Vibrationen am Zahn auftreten. Die Durchsicht der Literatur läßt einen Überblick gewinnen.

B Hauptteil

I. Literaturdurchsicht

a) Physik

1. Physik der mechanischen Schwingungen

In der Physik wird eine Schwingung folgendermaßen definiert: Eine Schwingung erfolgt, wenn ein Massenpunkt eine periodische Bewegung ausführt, bei der er in gleichen Zeitabständen immer wieder die gleichen Orte mit gleich großer und gleich gerichteter Geschwindigkeit durchläuft (38). Zur Beschreibung einer Schwinung ist es wichtig, die Schwingungszahl oder Frequenz, d.h. die Anzahl der Hin- und Herschwingungen je Sekunde, gemessen in Hertz ($1\ sec^{-1} = 1$ Hz), zu kennen. Häufig werden noch andere Werte bei Schwingungsmessungen angegeben. Als Amplitude wird der maximale Abstand eines Massenpunktes auf seinem Schwingweg von der Nullage bezeichnet. Die Amplitude wird mit einem Längenmaß gemessen (z.B. μ). Die doppelte Amplitude nennt man den Schwingweg, das ist die Summe der beiden größten Abstände von der Nullage bei zwei entgegensetzt gerichteten Schwingungsausschlägen. Soll bei einer gedämpften Schwingung die Amplitude nicht abfallen, so muß der Energieverlust ausgeglichen, d.h. die Schwingung immer wieder neu angeregt werden. Dazu ist eine periodische Krafteinwirkung notwendig. Diese sogenannte Wechselkraft wird in Pond (p) gemessen.

2. Der Zahn als schwingungsfähiger Körper

Damit ein Körper schwingen kann, muß er in gewissem Grade beweglich sein. Die physiologische Beweglichkeit des Zahnes ist bekannt. Mühlemann (23) verfolgte die Zahnbeweglichkeit messend durch verschiedene Abschnitte. Er findet bei horizontalen Bewegungen:
1. die initiale Zahnbeweglichkeit. Dabei kommt es ohne größeren Kraftaufwand (80 - 120 p) zur "spannungsfreien Streckung" der zunächst "ungeordneten Periodontalfasern", sowie zu einer intraperiodontalen Blutverschiebung.
2. die intermediäre Zahnbeweglichkeit. Der Weiterbewegung wird ein größerer Widerstand entgegengesetzt. Periodont, Alveole und perialveoläres Knochengewebe werden auf Zug und Druck beansprucht. Bei zunehmender Auslenkung ist eine größere Kraft notwendig (100-1500 p). und
3. die terminale Zahnbeweglichkeit. Es tritt eine elastische Durchbiegung des ganzen Alveolarfortsatzes auf ($>$ 1500 p).
Die einzelnen Abschnitte sind scharf beim funktionell beanspruchten Gebiß, unscharf beim jugendlichen und parodontotischen begrenzt. Als oberste Grenze der physiologischen horizontalen Beweglichkeit bis in die terminale Beweglichkeitszone wird beim Erwachsenen maximal 300 μ gemessen; bei Kindern und Jugendlichen ist sie höher. Untersuchungen des Drehpunktes, um den der Zahn bei horizontalen Bewegun-

gen gekippt wird, lassen erkennen, daß er durchaus nicht immer an der Grenze zwischen mittlerem und apikalem Drittel der klinischen Wurzel liegt. Das ist nur im Bereich der initialen Beweglichkeit der Fall; bei großen Kräften liegt das Drehzentrum jenseits des Apex.

Nach Zwirner (40) sind am Zahn Bewegungen in jeder Richtung und um jede Achse möglich. Er untersucht die Zahnbeweglichkeit experimentell am isolierten Rattenkiefer. Hier findet sich auch der Hinweis, daß es sich beim Zahn über die Beweglichkeit hinaus um ein "schwingendes System" handelt. Diese Bezeichnung wird von Häupel (15) benutzt und geht auf Weski (37) zurück. Aus Eigenfrequenzmessungen von Andreae, Eichner und Rohrbach (1) geht hervor, daß es sich tatsächlich so verhält. Die Schwingungen sind stark gedämpft. Die gefundenen Frequenzen liegen zwischen 300 und 1500 Hz.

3. Amplituden und Frequenzen von Schwingungen beim Bohren und Schleifen

Da beim Bohren und Schleifen durch die drehenden Instrumente Massenpunkte periodische Bewegungen ausführen, kommt es durch die Unmöglichkeit eines idealen, nicht exzentrischen Rundlaufs immer zu Schwingungen. Die Schwingungen werden beim Bohren und Schleifen auf den zu bearbeitenden Zahn übertragen und veranlassen ihn zum Mitschwingen (erzwungene Schwingung). Welche Frequenzen und Amplituden dabei zu erwarten sind, haben verschiedene Autoren untersucht. Keller und Kierse (20) verlangen auf Grund ihrer Untersuchungen höchste Präzision von den Bohrwerkzeugen. Dieser Forderung sind jedoch Grenzen gesetzt: Damit sich die Instrumente drehen können, ist ein gewisses Lagerspiel notwendig. In diesem Zwischenraum befinden sich Schmiermittel. Gerade hohe und höchste Touren verlangen größere Mengen von Schmiermitteln. Daher muß das Spiel bei diesen Instrumenten gegenüber den normaltourigen größer sein.

Aus Anfragen bei den Firmen Hager& Meisinger und Kaltenbach & Voigt ließ sich entnehmen, daß die Bohrerschäfte mit maximalen Toleranzen bis 15μ hergestellt werden. Die amerikanischen Vorschriften für die zahnärztlichen Schneidinstrumente, nach denen sich die großen Herstellerfirmen richten, lassen eine Exzentrizität bis zu 75μ zu. Das Lagerspiel beträgt bei der Imperator-Lagerung 10μ, bei normalen Handstücken 10-20μ, bei Winkelstücken bis zu 30μ; bei den Winkelstücken kommen noch die Toleranzen des Bohrerhaltelagers mit bis zu 8μ hinzu. So kann im ungünstigen Fall die Gesamtexzentrizität bei neuen Winkelstücken (zusammengesetzt aus der Exzentrizität des Bohrers, der Toleranz des Bohrerschaftes und des Bohrerhaltelagers, sowie dem Lagerspiel) 125μ oder etwa 0,1 mm betragen.

Bei den Schleifinstrumenten ist die Ungenauigkeit des Schleifkörpers zu beachten. Ilg (14) untersuchte den Rundlauf zahnärztlicher Schleifscheiben und zwar gängige unmontierte Schleifer auf ihren axialen (in Richtung der Drehachse) und radialen (senkrecht zur Drehachse) Schlag. Er findet als Summe der einzelnen Ungenauigkeiten für den

radialen Schlag bei neuen unmontierten Diamanten Werte zwischen 80 und 250μ, bei neuen Karborundsteinen zwischen 120 und 270μ, also etwa 0,25 mm maximal.

Die Exzentrizität hat bei der Umdrehung der Bohr- und Schleifinstrumente die Schwingung zur Folge. Die Amplitude der Schwingung hängt von der Größe der Exzentrizität ab, die Frequenz von der Umdrehungszahl.

Die durch die Rotation zahnärztlicher Instrumente erzeugten Frequenzen untersuchten Walsh und Symmons (33) an Bohrern und Handstücken im Modellversuch. Sie fanden, daß den Umdrehungszahlen entsprechende Frequenzen mit ihren Oberschwingungen auftreten, die sie mit Hilfe eines Kathodenstrahloszillographen registrierten. Z. B. beträgt bei einer angenommenen Umdrehungszahl von 6000 U/min die Grundfrequenz 100 Hz (6000 U/min entsprechen 6000 Schwingungen in der Minute; das sind 100 Schwingungen in der Sekunde, also 100 Hz). Bei 200 Hz tritt die 1. Oberschwingung und bei 300 Hz die 2. Oberschwingung auf.

Im National Bureau of Standards (USA) wurden die im Modellversuch auftretenden Frequenzen mit dem Kathodenstrahloszillographen und mit Zeitdehnungsaufnahmen untersucht (24, 25). Die Ergebnisse zeigen, daß bei Fissuren- und Rosenbohrern die durch die Umdrehungszahl gegebene Frequenz zusätzlich durch eine andere Frequenz überlagert wird, die der Anzahl der auftreffenden Bohrerschneiden entspricht. Bei einem 8-schneidigen Bohrer wird die Umdrehungsfrequenz auf das Achtfache erhöht, z. B. bei 6000 U/min von 100 Hz auf 800 Hz. Dies ist jedoch nur der Fall bei einem tadellos zentrisch laufenden Bohrer. Bei exzentrischen Bohrern berühren entweder nur einige Schneiden oder auch nur eine Schneide, nämlich die am weitesten vorstehende, den zu bearbeitenden Zahn. Daher gelangt man wieder zu einer der Umdrehungszahl entsprechenden Frequenz. Fast alle Bohrer sind aus fabrikatorischen Gründen minimal exzentrisch; die Schneiden werden in Grenzen unregelmäßig geformt sein. Es tritt meistens der letzte Fall für die Schwingungsursache ein (24).

Der Bohr- und Schleifvorgang wurde in allen zur Zeit verfügbaren Drehzahlbereichen von Eichner mit Zeitdehnung gefilmt (7). Normale, hohe und höchste Umdrehungen werden durch Filmvorführung und Einzelbildauswertung untersucht. Bei der Filmvorführung ist durch die 250fache Zeitdehnung zu sehen, daß beispielsweise bei einem Hartmetallbohrer im Imperator-Handstück, der sich mit 20 000 U/min dreht, nur noch eine Schneide an der zu bearbeitenden Zahnhartsubstanz (Elfenbein) angreift.

Diese Angaben, die von Versuchen außerhalb des Patientenmundes stammen, werden durch Untersuchungen und Messungen am Zahn selbst bestätigt. Andreae, Eichner und Rohrbach (1) führten sie mit einem kleinen Schwingungsaufnehmer durch, der nach dem Prinzip eines seismischen Systems arbeitet und zur Messung am Zahn mit schnellhärtendem Kunststoff befestigt wird. In dem Schwingungsaufnehmer werden, entsprechend den auftretenden Schwingungen beim Bohren und Schleifen am Zahn, kleine Spannungen induziert. Diese Meßimpulse

werden verstärkt mit einem Kathodenstrahloszillographen sichtbar gemacht. Bei 6000 U/min betragen die maximalen Schwingwege des Zahnes bei Anwendung eines ungelagerten Fissurenbohrers 40μ, beim gelagerten Hartmetallbohrer 24μ, beim nicht gelagerten Karborundstein 8,8μ. Sie sind am geringsten beim gelagerten Diamantinstrument ($\sim$ 12 mm) mit 1μ. Verfolgt man die Schwingungen bei verschiedenen Drehzahlen bis 200 000 U/min, so zeigt sich, daß zunächst alle sechs Schneiden des gelagerten Hartmetallbohrers während eines Umlaufs den Zahn treffen. Von 80 000 U/min an trifft nur noch eine Schneide den Zahn. Außerdem nimmt mit steigender Frequenz die Amplitude ab. Beim imperator-gelagerten Diamanten ist festzustellen, daß bei jeder Umdrehung im niedrigen Drehzahlbereich verschiedene Diamantkristalle den Zahn anstoßen. Auch hier erfolgt über 80 000 U/min nur noch ein Anstoß von dem am längsten aus dem Befestigungsmetall herausragenden Diamantkristall. Anders verhält es sich mit dem Schwingweg des Zahnes beim Schleifen. Er wird mit steigender Drehzahl bis 40 000 U/min größer, um dann bei 80 000 U/min wieder abzufallen.

Es können also am Zahn Frequenzen in Abhängigkeit von der Drehzahl des Instruments bis etwa 3000 Hz (das entspricht einem in der Turbine mit 180 000 U/min angetriebenen Instrument) nachgewiesen werden. Eine Darstellung der dabei auftretenden Schwingwege zeigt Abbildung 1 (aus Eichner (8)).

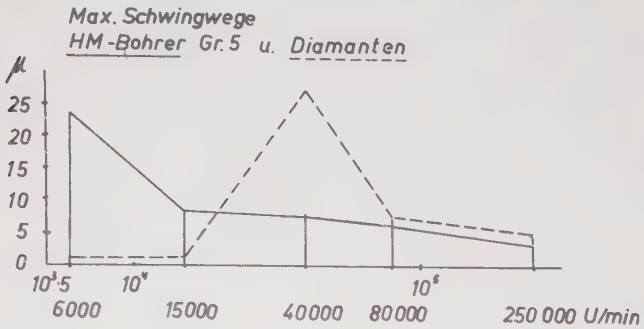


Abb. 1 Schwingwege in Abhängigkeit von der Frequenz

b) Physiologie

1. Allgemeiner Überblick

Im physiologischen Handbuch von Bethe - Bergmann (4) aus dem Jahr 1926 finden sich unter der Überschrift des von v. Frey bearbeiteten Kapitels "Tangoreceptoren des Menschen" (Band Receptionsorgane) im wesentlichen nur Angaben darüber, daß Vibrationen empfunden werden können und wie und wann ein "Schwirren" hervorgerufen wird. Als Instrument, um im Versuch Schwingungen zu erzeugen, wird die

Stimmgabel angegeben. Die Vibrationsempfindung sei "nicht eine Äusserung der oberflächlichen, sondern der tiefen Empfindlichkeit, insbesondere des Periosts und des Knochens."

Aus v. Skramliks "Psychophysiologie der Tastsinne" (1937)(30) ist zu entnehmen, daß die obere Grenze für Vibrationen "nicht mit der beschränkten Leistungsfähigkeit des Drucksinnes" zusammenhängt, "sondern vielmehr mit der des verwandten Apparates. Offenbar war die Amplitude der Schwinungen bei dieser Schwingungsfrequenz bereits so gering, daß eine Beeinflußung der Druckempfänger nicht mehr stattfand". Er schreibt, daß bei ausreichender Amplitude Schwingungen von über 3000 Hz gut verspürt wurden.

Die Durchsicht der "Berichte über die gesamte Physiologie und experimentelle Pharmakologie" (Verlag Springer, Berlin) von Band 97 (Schrifttum ab etwa 1936) bis Band 214 (Dez. 1960) ergibt, daß man vor dem Kriege viel an der Gewinnung von Versuchsergebnissen und an Einzelfragen arbeitete, so über Schwellenbestimmungen an der Haut in Abhängigkeit von der Frequenz, der Fläche, dem Reizort, der Temperatur, der Anästhesierung, des Alters. Aus anderen Arbeiten, bei denen Versuchspersonen auf Schütteltischen untersucht wurden, läßt sich entnehmen, daß 20 - 10 000 Hz nervöse Gereiztheit, z. T. die Aufhebung aller Hemmungen und das Schwinden des Patellarsehnenreflexes verursachen. Oder wenn 15 - 1000 Hz 2 Stunden auf den ganzen Körper einwirken, kommt es zur Verringerung der Sehschärfe und der psychischen Leistungsfähigkeit. Mehr als 140 Hz werden nicht auf den Kopf übertragen, wenn die Amplitude geringer als 0,05 mm ist. Bis 5 Hz wirkt der Körper als Masse, bei 5 - 40 Hz treten Resonanzerscheinungen auf, über 40 Hz ist die Federung des Menschen mit der Größe des erregenden Schwingweges maßgebend. Hauptresonanzpunkte liegen bei 5 Hz und 20 Hz. Schräge Schwingungen sind besonders unangenehm, sie bewirken Brechreiz. Bei horizontaler Bewegung kommt es am Kopf zu passiver, elleptischer Eigenbewegung, die als bedeutender Faktor bei der Entstehung von Bewegungskrankheiten angesehen wird.

Eine Zusammenstellung über die Vibrationsforschung ist von Keidel 1956 erschienen. Unter dem Gesichtspunkt der "Vibrationsreception" (19), wozu eigene Untersuchungen und die Arbeiten anderer Autoren herangezogen werden, wird eine Übersicht vom heutigen Stand der Vibrationsforschung gebracht. +) Die Sinnesphysiologie der Vibrationen umfaßt im einzelnen Reizung, Antransport, Rezeption, nervöse Erregung und Sinnesempfindung.

+) Alle folgenden Angaben sind, wenn kein besonderer Literaturhinweis gegeben ist, bei Keidel (19) entnommen.

2. Sinnesphysiologie

α) Reizung

Zu den ersten Vibrationsuntersuchungen wurden Stimmgabeln benutzt (4, 30). Wegen des raschen Amplitudenabfalls werden heute derartige Untersuchungen nur noch mit elektrischen Vibratoren durchgeführt. Die Übertragung der Vibrationen auf die Haut erfolgt mittels Scheiben oder eines Stiftes. Der Reizerfolg ist abhängig von der Reizfläche.

β) Antransport

Im Vergleich zum Drucksinn ist der Antransport der Reize verwickelter. Die Vibrationen breiten sich im Gewebe allseitig aus. Im allgemeinsten Fall ist lebendes Gewebe ein elastisch komprimierbares Medium, in dem die Schwingungen sich als Kompressions- und Scherwellen fortpflanzen (9). In der Haut herrschen bis 1000 Hz Scher-, darüber hinaus Kompressionswellen vor (17). Infolge der wechselnden mechanischen Eigenschaften (mechanischer Wellenwiderstand) der verschiedenen Gewebe ist die Ausbreitung der Wellen unterschiedlich, bis sie die Mechanorezeptoren erreichen. Am Körper müssen die Schwingungen durch die Epidermis bis zu den Kutispapillen (Meißnersche Tastkörperchen) oder durch das Korium zur Subkutis (Vater-Pacinische Körperchen) oder noch weiter durch Muskelgewebe bis

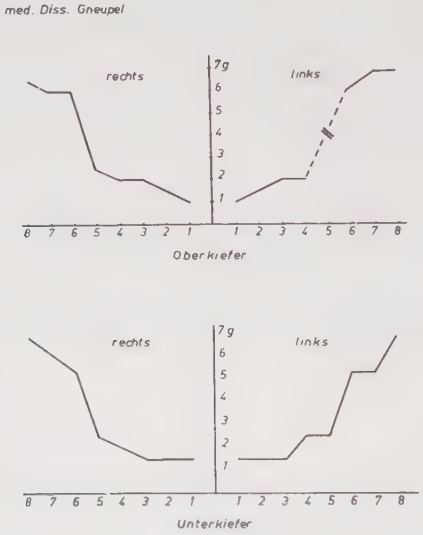


Abb. 2 Abhängigkeit der Kraftschwelle von der Art des Zahnes (aus: Skramlik, (31))

zum Periost. Am Zahn liegen andere Verhältnisse vor. Bei seinen Untersuchungen mit dem v. Freyschen Reizhaar vergleicht v. Skramlik (31) den Zahn mit einem Fühlhebel, der die Reize von der Aussenwelt zu den Rezeptoren im Periodontium überträgt. Bei den Kraftschwellenuntersuchungen Gneupels (10) mit v. Freyschen Reizhaaren zeigt sich eine Abhängigkeit von der Art des Untersuchten Zahnes, was auf die Länge und die Anzahl der Wurzeln und die Fläche des Periodontiums zurückzuführen ist (Abb. 2). Infolge seiner großen Steifigkeit überträgt der Zahn die Kräfte unverändert auf das Periodontium. Bei Vibrationen kommen die Wechselkräfte, die an den Zahn herangebracht werden, in Abhängigkeit vom Hebelarm (23) etwa in der gleichen Grössenordnung in unmittelbarer Nähe der Rezeptoren der Wurzelhaut (sogenannte "tiefe Vibrationsrezeption", (18))zur Wirkung. Außerdem läßt der enge Periodontalspalt kein Ausweichen des Gewebes mit den Rezeptoren zu, so daß weniger Energie in die Umgebung weitergeleitet wird als bei Vibrationen der Haut.

γ) Rezeptor

Die Frage der Rezeptoren wird nicht einheitlich beurteilt. Aus der z. T. örtlich verschiedenen Lage der Punkte für Druck- und Vibrationsreize wird ein spezifischer Vibrationsrezeptor, vornehmlich von v. Békésy (2, 3), vermutet. Die Haarpapille ist der Reizpunkt für Vibrationen, die Talgdrüse der für Druck. Bei einem schrägliegenden Haar liegen die beiden Punkte etwa 0, 5 mm auseinander. Die meisten anderen Autoren, v. Frey, v. Skramlik (30) und Keidel (16), vertreten die Ansicht, daß der Vibrationssinn eine spezielle Leistung des Drucksinnes ist. Dafür spricht, daß bei Betäubung des Reizgebietes mit 2%iger Novocainlösung die Rückkehr der Empfindlichkeit für Druck und für Vibration zur gleichen Zeit eintritt (Weitz, 35) und daß die Schwellenverschiebung für Vibrationen bei Erwärmung und Abkühlung des Reizortes - es kommt zu einem Schwellenanstieg - der des Drucksinnes entspricht (Weitz, 36). Als Mechanorezeptoren für die Aufnahme von Druck- und Vibrationsreizen werden histologisch und physiologisch die Meißnerschen, die Vater-Pacinischen und die Merkelschen Körperchen angesehen.

Die Mechanorezeptoren beim Zahn liegen im Periodontium (13, 29). Die Pulpa ist nur in der Lage, Schmerzempfindungen zu rezipieren, wie die Untersuchungen mit dem v. Freyschen Reizhaar an pulpentoten Zähnen zeigen (31). Man erhält die gleichen Meßergebnisse wie an pulpengesunden Zähnen. Die Rezeptoren der Wurzelhaut sind sehr empfindlich. Haare und dünne Drähte mit einem Durchmesser von 50 μ werden wahrgenommen. Druck und Vibration werden nur scheinbar an den Zähnen empfunden. Die Innervation der Endorgane ist kompliziert. Einzelne Nervenfasern können mehrere Rezeptoren versorgen, wie umgekehrt ein einzelner Rezeptor an mehrere Nervenfasern angeschlossen sein kann. Es werden also meist Gruppen von Rezeptoren erregt.

d) Erregungsimpulse

Bei Betrachtung der Nervenphysiologie zeigt es sich, daß ein Unterschied zwischen den Aktionspotentialen besteht, die bei Druck- und Vibrationsreizen von den zentripetalen Nerven abgenommen werden können. Nach Keidel (16) sind bei Druckreizen die drei physikalischen Reizeigenschaften Reizort, Reizstärke und Reizzeit zu übermitteln. Dazu stehen dem Drucksinn die anatomische Faserverbindung zum Reizort, die Impulsfrequenz der Entladungen in dem abführenden Nerv und die Adaptation der Impulse zur Verfügung. Die Adaptation ist die Änderung, nämlich ein Abfall, der Impulsfrequenz mit der Zeit. Empfindungsmäßig äußert sich die Adaptation in einem Verblassen des Sinneseindrucks. Die Kleidung, die am Körper getragen wird, reizt die Druckrezeptoren, und infolge der Adaptation spürt man sie nach kurzer Zeit nicht mehr. Der Reizeigenschaft Reizstärke entspricht die physiologische Sinnesleistung Impulsfrequenz, dem Reizort die anatomische Faserverbindung und der Reizzeit die Adaptation. Für die Reizcharakteristik Frequenz beim Vibrationssinn fehlt zunächst ein weiterer physiologischer Übertragungsmechanismus. Im Ohr wird die Reizfrequenz dem Erregungsort (Lage der Sinneszellen im Cortischen-Organ auf der Basilarmembran) zugeordnet. Beim Vibrationssinn ist aber die anatomische Faserverbindung wie beim Drucksinn zur Übermittlung des Reizortes besetzt. Echlin und Fessard (5) und Pfaffmann (27) haben gezeigt, daß es bei Vibrationsreizen zu synchronen Entladungen im Nerv kommt. Wenn die Entladungsfrequenz die Reizfrequenz überträgt, fehlt jetzt ein Übertragungsmechanismus für die Reizstärke. Nach Keidel ist die Übermittlung jedoch möglich, wenn mehrere Fasern mit verschiedener Schwellenempfindlichkeit ihrer Rezeptoren zusammengeschaltet sind. Bestimmte Rezeptoren werden erst bei größerer Intensität erregt. Das bedeutet, daß beim Vibrationssinn der Ort eine Bedeutung für die Reizstärke hat. Keidel nennt das "örtliche Reizintegration" und stellt ihr die "zeitliche Reizintegration" (nach O. F. Ranke) gegenüber (16). Das heißt, daß an sich unterschwellige Erregungen mehrerer Sinneszellen bei "phasengerechter Summation" am Anschirrungspunkt des gemeinsamen Nerven die Schwelle erreichen können. Die "phasengerechte Summation" ist wegen der unterschiedlichen Wellengeschwindigkeit bei den einzelnen Frequenzen (17) auch abhängig von der Frequenz. Hierbei sind Erregungsgröße und Reizfrequenz miteinander gekoppelt.

Pfaffmann (27) machte interessante Versuche an Katzenzähnen. Mit einem elektrischen Vibrator brachte er die Zähne zum Schwingen und nahm von den dazugehörigen Trigeminusästen die Aktionspotentiale ab. Er fand dabei, daß die Vibrationsreize an den Zähnen synchrone Impulse in den Nervenfasern verursachen. Frequenz und Entladungen des Nerven entsprechen sich bis maximal 1500 Hz (die Hautnerven vermögen Vibrationsreizen synchron nur bis 700 Hz zu folgen). Hält die Vibrationsreizung einige Zeit an, so kommt es innerhalb weniger Sekunden zur Adaptation, die sich in einem Amplitudenabfall äußert. Dies tritt bei den höheren Frequenzen am ausgeprägtesten ein. Reizt man mit noch höheren Frequenzen, so tritt das Alternieren

ein, d.h. die Erregungen im Nerven folgen nur zur Hälfte, später nur zu einem Drittel usw. den Reizimpulsen. Dieses Synchronisationsverhältnis kann bis zum Verhältnis von 1:5 gehen. Die Synchronisation der Erregungen zu einem Bruchteil der Reizfrequenz gilt für die einzelnen Nervenfasern. Bei einem Nervenstrang, der aus vielen einzelnen Nervenfasern besteht, kann wieder die gesamte Frequenz nachgewiesen werden, da z.B. bei einer Halbierung der Frequenz in der einzelnen Nervenfaser eine erste Faser bei der ersten Schwingung, eine zweite bei der zweiten Schwingung der Reizfrequenz die Erregung fortleitet und dann die erste Faser wieder leitfähig ist, weil sie ihre Refraktärzeit überwunden hat. Es ist daher durchaus möglich, Frequenzen oberhalb der Refraktärzeit des Nerven zu rezipieren und zu empfinden. Das steht im Gegensatz zu den Ausführungen von Pätzold, Behne und Seegers (26), wonach wegen der Refraktärzeit der Nervenfasern von 1 msec eine obere Grenzfrequenz von etwa 1000 Hz bestehen müßte.

3. Schwellen und Frequenzgrenzen

Während der Schwingungsreiz und die Schwingungserregung objektiv meßbar sind, ist die Schwingungsrezeption, wobei es zur bewußten Empfindung kommt, nur aus den subjektiven Angaben der untersuchten Person zu beurteilen. Bei Keidel (19) läßt sich aus dem Kapitel "Schwellen als Empfindungsmaße" entnehmen, bei welchen Amplituden die verschiedenen Schwellenwerte liegen. Es ist zu unterscheiden zwischen der Absolutschwelle,

der Intensitätsschwelle,
der Frequenzunterschiedsschwelle und
der Amplitudenunterschiedsschwelle.

Die Absolutschwelle ist die kleinste überhaupt gefundene Amplitude, bei der ein Vibrieren gerade spürbar wird; sie wird mit 0,1μ (Mittelwert) bei 200 Hz an der Fingerspitze angegeben.

Die Intensitätsschwelle ist durch diejenige Amplitude gegeben, bei der ein Vibrieren gerade spürbar wird. Sie ist abhängig von der Frequenz, dem Reizort, dem Auflagedruck und der Reizfläche. Die Frequenzabhängigkeit äußert sich darin, daß z.B. bei Vibrationsreizung des Fingers mit steigender Frequenz bis 200 Hz die zur Reizung notwendige Amplitude immer kleiner wird, um danach wieder größer zu werden. Die Schwellenkurve für die Fingerkuppe bewegt sich zwischen 0,1 und 10μ. Bei Reizung der Stirn steigt die notwendige Amplitude laufend mit zunehmender Frequenz. In dem unterschiedlichen Verlauf der Kurven zeigt sich die Ortsabhängigkeit, die sich außerdem noch darin äußert, daß die einzelnen Körperregionen verschieden empfindlich sind. Laidlow (21), zitiert bei Keidel, gibt an, daß "die palmaren Fingerkuppen die empfindlichsten Stellen sind, ferner Gesicht und Zähne. Es folgen alle anderen Körperregionen in mehr oder minder großem Abstand". Die verschiedenen Schwellen unterscheiden sich um 2-3 Zehnerpotenzen. Die ortsabhängige Empfindlichkeit ist abhängig von den physikalischen Eigenschaften des Antransportorgans (Fett, Muskulatur, Knochen) und der Dichte der Rezeptoren. Die Schwellen bei verändertem Auflagedruck am Zeigefinger weisen eine Schwellensenkung

und eine Verschiebung der optimalen Reizfrequenz zu höheren Frequenzen auf. Die optimale Reizfrequenz ist bei gleichem Reizort diejenige Frequenz, bei der die notwendige Amplitude zur Reizung am kleinsten ist. Ein vergrößerter Auflagedruck hat eine größere Vorspannung der elastischen Strukturen der Gewebe zur Folge, somit erhöht sich die Hautwellengeschwindigkeit und der Wellenwiderstand. Die Haut nimmt bei gleicher Schwingweite mehr Energie auf, der Druckabfall am Rezeptor wird größer und deshalb die Schwelle niedriger. Die Veränderung der Reizfläche hat eine Veränderung der Schwelle zur Folge, die orts- und frequenzabhängig ist.

Neben der Intensitätsschwelle hat man noch die Frequenzunterschiedsschwelle und die Amplitudenunterschiedsschwelle untersucht. Die Frequenzunterschiedsschwelle wird mit etwa 10% angegeben (beim Ohr optimal 0,2%). Die Amplitudenunterschiedsschwelle beträgt an der Fingerkuppe 10-15% (Ohr 7%). Sie ist nur in Schwellennähe frequenzabhängig. Die Reizstärkenabnahme ist leichter zu erkennen als die Reizstärkenzunahme.

Die obere Frequenzgrenze läßt sich wie die obere Hörgrenze nicht genau festlegen. Es sind verschiedene Werte gefunden worden, die sich in weiten Grenzen von 500 - 8000 Hz bewegen. Oberhalb von 500 Hz steigt die Schwelle stark an und durch die Adaption kommt es zu einem Verblassen der Vibrationsempfindung. Eine untere Frequenzgrenze besteht nicht, da die Vibrationsempfindung fließend in die reine Druckempfindung übergeht.

Am Zahn ist die obere Frequenzgrenze von Walsh und Symmons (33) und von Walser (34) mit elektromagnetischen Schwingungserregern untersucht worden. Die ersten beiden Autoren finden eine mittlere Grenze von 600 Hz, maximale Werte von 1000 Hz, Walser eine mittlere Grenze von etwa 1000 Hz und einen Maximalwert von 1600 Hz.

Bei allen Untersuchungen fällt die breite individuelle Streuung der gewonnenen Versuchsergebnisse von 2 Zehnerpotenzen auf. Goodfellow (11) findet als Streuungsbreite bei wiederholten Schwellenbestimmungen für den Vibrationssinn 5 dB, für das Ohr 3 dB (dB = Dezibel, Maß für den Schalldruck). Die Schwankungen sind nicht abhängig von der Tageszeit. Ebenso läßt sich kein eindeutiger Übungsfaktor angeben. Auf die große Streuung der Meßergebnisse weisen auch Walsh und Symmons (33) bei ihren Untersuchungen hin, ohne jedoch Zahlenwerte für die Streuung anzugeben. Keidel (16) gibt für die intraindividuelle Streuung an, daß sich die Schwellenkurven selten "zügig" ziehen lassen. Die Streuung wird geringer unter Hynotika und stärker - mit Schwellensenkung - unter Pervitin, so daß an eine zentrale Ursache der Streuung gedacht werden muß. Die interindividuelle Streuung bewegt sich in den Grenzen einer Zehnerpotenz, maximal zwei Zehnerpotenzen.

4. Verdeckung durch Schalleindrücke

Jedes Vibrieren hat einen der Frequenz entsprechenden Ton zur Folge, der bei den Untersuchungen häufig über der Hörschwelle liegt. Dieser zweite Reiz lenkt vom ersten ab; eine solche Erscheinung wird als Verdeckung bezeichnet. Bei Vibrationsuntersuchungen bewirken Schalleindrücke, besonders solche gleicher Frequenz, eine große Verdekkung (Rubin, 28). Dies läßt sich aus der Ähnlichkeit beider Sinne verstehen. Beide werden durch Schwinungen gleicher Art und gleicher Frequenz gereizt. Außerdem kommt noch die Überlegenheit des Ohres hinzu, die nach v. Frey (4) größenordnungsmäßig für hohe Töne das Billionenfache, für tiefe das 500fache beträgt. Deswegen werden Vibrationsmessungen oft bei leiser Radiomusik zur Verdeckung des Tones durchgeführt. Nach Lerche (22), der Wegel, R.L. und Lane, C.K., Physic. Rev., 23, 266 (1924) zitiert, ist beim Ohr die Verdeckung von einem Ton durch einen anderen frequenzabhängig. Bei großem Frequenzabstand ist keine Verdeckung vorhanden. Mit kleiner werdendem Abstand vergrößert sich die Verdeckung, um bei sehr engem Abstand infolge von Schwebungen zwischen Primär- und Sekundärton wieder abzunehmen.

II. Eigene Untersuchungen

a) Versuchsaufbau

1. Schwingungserreger

Die Untersuchungen von Walsh und Symmons (33) sind für Eichner Anlaß gewesen, für die eigenen Untersuchungen bei der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin-Dahlem, Abteilung für elektrische Meßtechnik, Leiter Dr. Ing. Chr. Rohrbach, von Dipl.-Ing. Andreae einen speziellen Schwingungserreger entwickeln zu lassen. Die Angaben über das Gerät stammen aus einem Bericht der BAM.

Ein elektromagnetisches System bringt einen Stößel zum Schwingen, von dem die Schwingungen auf einen Zahn übertragen werden (Abb. 3, 4 und 6). Zwischen dem permanenten Kernmagneten (Abb. 4) (a) und dem eisernen Rückschlußzylinder (c) besteht in dem Luftspalt (b) ein magnetisches Feld. In diesem kann sich die Spule (g) bewegen, die über ein Isolierteil (d) von zwei spiralförmigen Blattfedern (f) gehalten wird. Die Federn sind isoliert am Rückschlußzylinder verschraubt und dienen gleichzeitig als Stromzuführung für die Spule. Mit dem Isolierteil (d) ist ein sogenannter "Käfig" (e), in dem sich Bariumtitanatscheiben befinden (h), fest verbunden. Mit einem weiteren Paar spiralförmiger Blattfedern (f) am Käfig wird das Ganze versteift, so daß seitliche Bewegungen verhindert werden. In den Käfig (e) ist ein Stift als Stößel (i) eingeschraubt. Wird die Spule von einem Strom durchflossen, so baut sich ein magnetisches Feld um die Spule auf. Das schon bestehende Feld des Permanentmagneten stößt das neue Feld ab oder zieht es an, je nach der Stromrichtung in der Spule. Wird die Spule an einen Wechselstrom angeschlossen, so ändert sich entsprechend der Frequenz das magnetische Feld der Spule und damit Anziehung und Abstoßung der Spule. Es kommt zum Schwingen der Spule mit allen an ihr festverbundenen Teilen: Isolierteil, Käfig und Stößel. Vom Stößel können die erzeugten Schwingungen auf den Zahn übertragen werden. Damit der eiserne Stößel nicht zu hart an den Zahn klopft, ist er mit Kunststoff (Palvit) überzogen. Die Frequenz der Schwingungen ist abhängig von der Frequenz des Wechselstroms, die Stärke der Schwingungen von der Stromstärke. Da Federn, Spule, Isolierteil, Käfig und Stößel ein schwingendes System bilden, können sich die Schwingungen bei Eigenfrequenzen dieses Systems oder seiner Teile aufschaukeln und unkontrollierbar stark werden. Die vom Stößel abgegebenen Wechselkräfte werden deshalb mit Hilfe der Bariumtitanatscheiben gemessen. In den Scheiben entsteht proportional zur Wechselkraft eine Wechselspannung (piezoelektrischer Effekt), die auf dem Leuchtschirm eines Kathodenstrahloszillographen sichtbar gemacht wird.

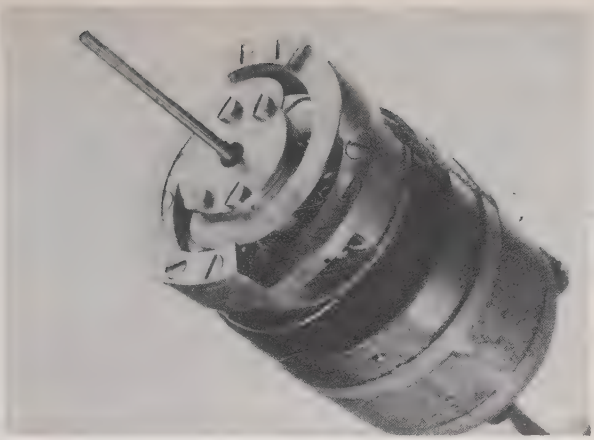


Abb. 3 Schwingungserreger ohne Schutzkappe
Durchmesser: 45 mm
Länge mit Schutzkappe: 90 mm
Stößel: 40 mm

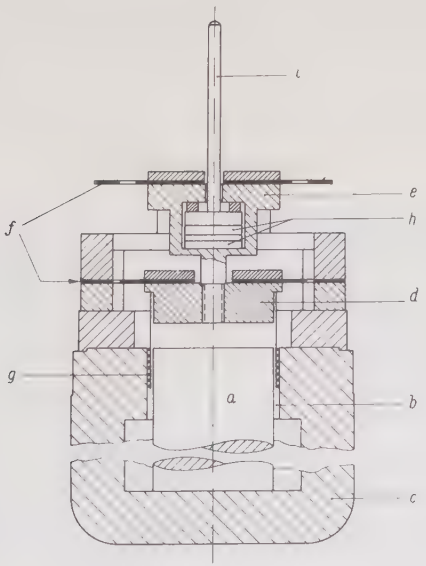


Abb. 4 Schwingungserreger im Schnitt

Als Beziehung zwischen der Wechselkraft K und der Wechselspannung U der Bariumtitanatscheiben gilt:

$$K = \frac{1}{M} E U$$

Dabei bedeutet der Faktor E die Empfindlichkeit, die bei einem Eingangswiderstand des Oszillographen von 1 MΩ den Wert 90 p/mV ±10% hat. M ist ein frequenzabhängiger Maßstabsfaktor, der aus Abb. 5 zu entnehmen ist. Die Spule des Schwingungsgebers kann mit Wechselströmen zwischen 20 Hz und 2500 Hz und bis 350 mA im Dauerbetrieb oder 500 mA kurzzeitig (ca. 1 Minute) belastet werden.

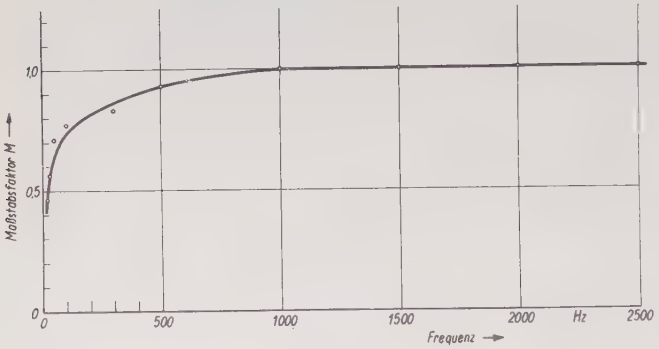


Abb. 5 Größe des Maßstabsfaktors M für die Wechselkraft

Abb. 6 Schwingungserreger und Meßdose bei der Untersuchung eines + 2,200 p Vorkraft

2. Vorkraft

Um das Gerät mit einer definierten Vorkraft an den Zahn zu drücken, wird es in die mit Filz ausgelegte Schelle eines U-förmigen Bügels eingespannt (Abb. 6). Der Bügel ist mit den Enden seiner Schenkel wie ein Pendel auf zwei Schneiden gelagert. Je weiter der Bügel mit dem Schwingungserreger aus seiner Ruhelage ausgelenkt wird, desto mehr Kraft ist dazu notwendig. Die Größe der Kraft - je nach der Weite der Auslenkung - ist auf einer über die beiden Schenkel des Bügels anzuvisierenden Skala abzulesen. Die Skala wurde mit einer Federwaage geeicht. Die Vorkraft schwankt wegen der unvermeidbaren Bewegungen der Versuchspersonen um etwa $\pm$ 5%. Bügel und Skala sind an einem rechtwinklig abgebogenen Rohr befestigt, dessen eines Ende drehbar in der Muffe eines zahnärztlichen Gerätes (Einheit) steckt.

3. Meßdose

Bei einem Teil der Untersuchungen wird zur Messung der Schwingwege der in der Versuchsanordnung von Andreae, Eichner und Rohrbach (1) gebrauchte Schwingungsaufnehmer benutzt (Abb. 6 und 7). Bei diesen Autoren finden sich die Angaben über den Versuchsaufbau und die Berechnung des Schwingweges aus den gewonnenen Meßergebnisse.

4. Übrige Geräte

Um den Schwingungsgeber zum Schwingen zu bringen, sind folgende Zusatzgeräte (Abb. 8) notwendig:

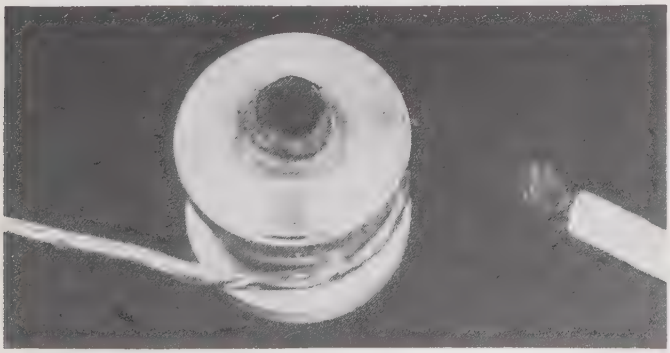
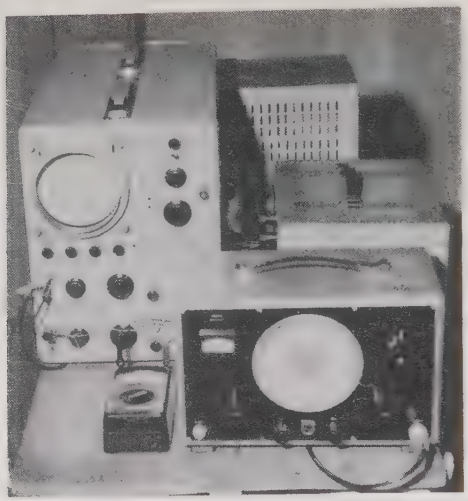


Abb. 7 Meßdose für Schwingwege
Durchmesser: 14 mm
Höhe: 14 mm
Gewicht: 1,2 g

Abb. 8 Geräte für Schwingungserreger und Meßdose



Hinten: Vorverstärker; Mitte links: 2-Strahl-oszillograph; Mitte rechts: Leistungsverstärker; vorne links: Amperemeter; vorne rechts: Tonfrequenzgenerator

Ein Tonfrequenzgenerator (Philips GM 2317), um entsprechende Frequenzen zu erzeugen und die Stromstärke zu regulieren; ein Leistungsverstärker (Philips GM 4532), um die notwendigen Stromstärken zu erreichen. Der vom Leistungsverstärker abgegebene Strom wird mit einem Amperemeter (Hartmann & Braun, Multavi II) gemessen.

Zur Registrierung der Wechselkraft werden die Spannungsimpulse der Bariumtitanatscheiben über ein doppelt abgeschirmtes Kabel zu einem Vorverstärker (Eigenkonstruktion der BAM, V$\sim$ 37fach) geleitet und von dort weiter zum oberen Strahl eines Zweistrahl-Oszillographen (Tektronix, Inc., Portland, Oregon, USA; Type 502 Dual-Beam Oscilloscope). Aus den Amplituden der auf dem Leuchtschirm erscheinenden Sinuskurven (Abb. 9) läßt sich bei Kenntnis der am Oszillographen eingestellten Empfindlichkeit (meist 30 mV/cm), dem Verstärkungsfaktor des Vorverstärkers (37fach), der Empfindlichkeit der Bariumtitanatscheiben (90 p/mV) und der Größe des frequenzabhängigen Maßstabsfaktors (Abb. 5) die Wechselkraft berechnen. Die Spannung U der Bariumtitanatscheiben läßt sich aus dem Ausschlag am Oszillographen nach folgender Gleichung

$$U = E_1 \; a \; \frac{1}{V} \left[\frac{mV}{mm} \; mm\right]$$ berechnen, wobei E_1 die jeweilige Empfindlichkeit des Oszillographen, V der Verstärkungsfaktor des Vorverstärkers und a der doppelte Amplitudenausschlag auf dem Leuchtschirm

in mm sind. Wird bei $K = \frac{1}{M} E U$ die Spannung U durch $E_1 \frac{1}{V} a$ ersetzt, läßt sich mit $K = \frac{1}{M} E E_1 a \frac{1}{V} \left[\frac{p}{mV} \frac{mV}{mm} mm\right]$ die Wechselkraft direkt aus den abgelesenen Werten für a errechnen.

Bei den Schwingungsmessungen werden die erzeugten kleinen Wechselspannungen über eine abgeschirmte Leitung auf die untere Spur des Oszillographen gebracht. Der Schwingweg läßt sich nach den Angaben von Andreae, Eichner und Rohrbach (1) aus der auf dem Leuchtschirm gemessenen doppelten Amplitude (der Spannung!) nach folgender Gleichung berechnen: $A = \frac{U}{ME}$. Dabei bedeuten A der Schwingweg, U die induzierte Spannung, M der von der Frequenz abhängige Maßstabsfaktor und E die Empfindlichkeit der Meßdose.

Die beschriebenen Geräte und die Meßeinrichtung sind von der Abteilung für elektrische Meßtechnik der BAM zur Verfügung gestellt und auf die Funktionstüchtigkeit von Dipl.-Ing. Andreae ständig überwacht worden.

b) Versuchsdurchführung

Bei der Durchführung der Versuche wird die Versuchsperson auf einen zahnärztlichen Operationsstuhl gesetzt. Der Kopf lehnt an der Kopfstütze so steil, daß der Stößel des Schwingungserregers möglichst senkrecht auf der labialen Fläche des zu untersuchenden Zahnes steht (Abb. 6). Die Stößelunterkante schließt mit der Schneidekante ab, damit alle Zähne gleich angeregt werden (etwa gleicher Hebelarm). Außerdem berührt der Stößel den Zahn in der Mitte, damit Torsionsschwingungen möglichst vermieden werden. Der Stößel lehnt durch Auslenkung des Bügels mit einer bestimmten Vorkraft am Zahn. Die Untersuchungen sind in der Regel mit einer Vorkraft von 200 p (ungefähr ± 10 p) durchgeführt worden. Eine Vorkraft von 200 p wurde gewählt, weil ein Abheben des Stößels vom Zahn bei größeren Wechselkräften verhindert werden soll.

Zur Messung des Schwingweges wird die Meßdose in Verlängerung der Achse des Stößels palatinal an dem zu untersuchenden Zahn mit schnellhärtendem Kunststoff befestigt (Abb. 6).

Bei der Bestimmung der Intensitätsschwelle wird der Zahn zunächst mit überschwelligen Amplituden bei verschiedenen Frequenzen angeregt, um der Versuchsperson einen Eindruck vom Vibrationsempfinden zu vermitteln. Sie wird aufgefordert, nur auf das Vibrieren am Zahn zu achten, nicht auf Schalleindrücke. Dann wird bei 50 Hz mit der Amplitude 0 beginnend der Strom am Tonfrequenzgenerator immer mehr vergrößert, bis der Proband die Wahrnehmung des Vibrierens durch ein Handzeichen anzeigt. In Abständen von 50 Hz, zwischen 600 Hz und 800 Hz oft in Abständen von 10 Hz, wird die untere Schwelle so weit untersucht, bis sie sich durch Erreichen der Belastungsgrenze des Schwingungserregers von maximal 0,5 A nicht bei noch höheren Frequenzen feststellen läßt. Bei einem zweiten Durchgang, wiederum mit 50 Hz beginnend, wird der Zahn so stark ange-

regt, daß sicher ein Vibrieren verspürt wird, und dann die Wechselkraft laufend vermindert, bis nichts mehr zu spüren ist. Diese Untersuchung wird wie beim ersten Durchgang bei den verschiedenen Frequenzen durchgeführt. Immer wenn die Versuchsperson das Einsetzen oder Verschwinden des Vibrationsempfindens angibt, werden die dazugehörigen Meßwerte für die Wechselkraft, den Schwingweg und in einigen Fällen für die aufgewandte Stromstärke notiert. Abb. 9 zeigt in den oberen Kurven die Wechselkräfte, in den unteren die dazugehörigen Schwingwege bei 400 Hz, 600 Hz und 1000 Hz, wie sie auf dem Leuchtschirm erscheinen und dann mit Hilfe des davor befindlichen Meßnetzes in mm abgelesen und aufgeschrieben werden. Die beiden Durchgänge mit ansteigender und abfallender Amplitude werden je nach Versuchsperson und Zeitaufwand bei Wechselkraftmessung 4 bis 5 mal,

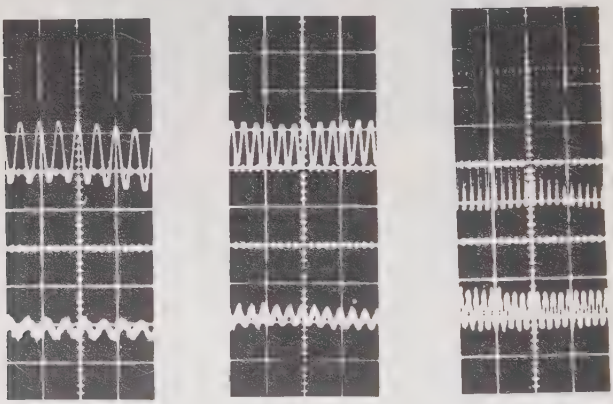


Abb. 9 Einzelne Wechselkraft- und Schwingweganzeigen
bei 400, 600 und 1000 Hz von einem 2+
obere Kurven: Wechselkraft
untere " Schwingweg
Kantenlänge der Meßnetzquadrate 10 mm

bei zusätzlichen Schwingwegmessungen 2 mal durchgeführt. Die Messungen an einem Zahn dauern etwa 2 Stunden bei Wechselkraftmessungen und etwa 3/4 bis 1 Stunde bei Schwingwegmessungen. Die Schwellenbestimmung mit Messung des Schwingweges lassen sich nicht länger ausdehnen, da der Mund offen gehalten werden muß. (Ein Schließen ist wegen der palatinal befestigten Meßdose nicht möglich). Bei länger dauernden Messungen lenkt der immer mehr austrocknende Mund ab, so daß die Meßwerte nicht mehr unter den gleichen Bedingungen gewonnen werden. Auf den Seiten 28 bis 35 sind die Meßwerte von zwei Versuchspersonen mit je zwei Messungen zu finden.

c) Versuchspersonen

Als Versuchspersonen sind 43 Studenten (11♀, 32♂) mit einem Durchschnittsalter von 23 Jahren 6 Monaten in den Grenzen von 19; 4 bis 33; 0 Jahren herangezogen worden. Die untersuchten Zähne sind klinisch gesund (Lockerungsgrad 0) und stehen frei, um ein unkontrollierbares Mitschwingen von Nachbarzähnen zu vermeiden. Es wurden untersucht:

Zähne	Zahl
+1, 1+	55
+2, 2+	11
+3, 3+	2
-1, 1-	3
-2, 2-	3

Dabei erfolgten:

12 350 Wechselkraftmessungen
1 150 Stromstärkemessungen
3 500 Schwingwegmessungen

d) Versuchsergebnisse

1. Allgemeine Angaben der Versuchspersonen

Das Vibrieren des Zahnes wird bei niedrigen Frequenzen als Klopfen, bei höheren als Kribbeln oder Schwirren empfunden. Ab etwa 250 Hz ist infolge der guten Knochenleitung für die hohen Töne vor dem Eintreten der Vibrationsempfindung bereits ein der Frequenz entsprechender Ton zu hören, der ab etwa 700 Hz unangenehm laut wird. Es summt oder singt dann wie beim Bohren und Schleifen im ganzen Kopf, ohne daß man angeben könnte, daß die Anregung dazu vom Zahn ausgeht. Bei verschlossenem äußeren Gehörgang kann wegen der geringeren Schallabstrahlung schon ab 50 Hz ein Ton wahrgenommen werden. Da oberhalb von 700 Hz der Eindruck des Vibrierens wegen der stärker werdenden Adaptation immer undeutlicher wird, ist die Beurteilung der höheren Frequenzen sehr schwierig.

2. Meßergebnisse

Zur Objektivierung der Intensitätsschwelle sind die Meßergebnisse von 90 Untersuchungen (als Beispiele siehe Seite 28-35) notiert worden. Aus den einzelnen Meßwerten, bei denen infolge der Ableseungenauigkeiten ein maximaler Fehler von etwa $\pm$ 10% anzunehmen ist, wird der Mittelwert (= arithmetisches Mittel) (12, 32) errechnet und dann durch den frequenzabhängigen Maßstabsfaktor dividiert. Die Werte sind zur Umrechnung in die Wechselkraft (in p) noch mit

Dierks 16.1.39 ♀ 2,1;4 1 13.5.60 11^{00}-12^{50} 200r 30mV/cm	50 1 1 2 1 1 1 1 1 9 1,1 1,4	100 1 1 2 2 1 1 1 1 10 1,2 1,4	150 10 2 2 2 2 2 2 3 2 17 2,1 2,5
200 2 1 2 1 3 1 3 1 14 1,8 2,1	250 2 1 2 2 2 2 1 1 13 1,6 1,9	300 2 2 3 2 3 2 2 2 18 2,2 2,5	350 3 1 3 2 3 3 2 2 19 2,4 2,6
400 2 2 2 2 3 2 3 3 19 2,4 2,5	450 2 2 3 2 4 3 2 4 22 2,8	500 4 3 3 5 4 2 4 2 27 3,4	550 7 3 4 2 5 3 7 5 36 4,5
600 5 4 4 2 5 2 7 5 34 4,2	610 5 4 5 3 3 3 7 8 38 4,8	620 7 4 6 3 6 2 6 7 41 5,1	630 6 6 8 7 11 6 8 7 59 7,4
640 9 10 8 7 3 4 10 12 63 7,9	650 10 9 10 10 10 7 10 15 81 10,1	660 9 8 10 9 20 8 8 12 84 10,5	670 10 10 10 9 18 6 20 15 98 12,2
680 12 10 20 11 20 18 90 30 211 26,4	690 30 12 18 30 30 50 10 25 205 25,6	700 20 20 25 15 30 30 12 50 202 25,2	

Meßergebnisse der 10. Untersuchung
Erläuterung im Text Seite 27 und 36

710 8 10 30 30 15 12 9 40 154 19,2	720 11 10 6 7 12 8 8 45 107 13,4	730 10 6 6 6 8 10 5 20 71 8,9	740 10 7 4 3 8 12 5 5 54 6,8
750 7 6 4 6 6 12 4 10 55 6,9	760 15 8 6 6 5 20 11 30 101 12,6	770 12 7 8 4 5 18 6 18 78 9,8	780 13 9 3 8 7 7 6 20 73 9,1
790 16 10 5 9 11 10 10 15 86 10,8	800 6 15 5 8 6 28 12 20 100 12,5	820 4 15 5 7 12 25 13 15 96 12,0	840 10 20 7 11 8 10 15 12 93 11,6
860 7 5 8 9 9 10 14 12 74 9,2	880 12 20 8 12 15 20 14 25 126 15,8	900 10 4 10 11 16 30 11 18 110 13,8	920 9 15 12 15 20 35 15 25 146 18,2
940 7 14 12 12 6 30 12 20 113 14,1	960 12 15 14 12 25 >40 20 20 158 19,8	980 20 >15 17 15 >18 >30 18 >25 >158	1000 12 >15 >15 >15 >10 >22 >10 >15
1050 >18 >20	1100 30 >30	1150 >30 30	1200 45 >35

Meßergebnisse der 10. Untersuchung

Dierks 16.1.39			50			100			150			13			
♀ 21;4			1	2		1	1		3	1					
1] 16.5.60			1	2		1	1		2	1					
11^{10}-13^{00}			2	1		1	1		2	1					
			1	1		1	2		2	1					
			11			9			13						
200p			1,4			1,1			1,6						
30mV/cm			1,8			1,3			1,9						
200			250			300			350						
1	1		1	2		2	1		1	2					
1	1		2	1		3	1		4	1					
3	1		3	2		2	1		5	2					
2	1		2	1		4	1		2	1					
11			14			15			18						
1,4			1,8			1,9			2,2						
1,6			2,1			2,1			2,4						
400			450			500			550						
3	2		3	4		4	5		4	3					
6	2		6	2		8	6		6	4					
3	2		2	3		3	3		2	4					
3	1		2	1		3	2		6	2					
22			23			34			31						
2,8			2,9			4,2			3,9						
2,9															
600			610			620			630						
4	5		4	3		5	5		6	6					
6	3		4	3		3	4		5	5					
5	4		6	4		4	3		6	10					
6	2		3	2		3	3		6	8					
35			29			30			52						
4,4			3,6			3,8			6,5						
640			650			660			670						
5	5		2	5		4	10		6	6					
12	5		8	4		6	4		9	5					
7	10		8	7		9	8		12	10					
10	7		9	9		15	9		15	10					
61			52			65			73						
7,6			6,5			8,1			9,1						
680			690			700									
14	7		15	11		30	18								
12	4		20	10		30	10								
20	10		40	20		30	25								
40	11		65	30		37	30								
118			211			210									
14,8			26,4			26,2									

Meßergebnisse der 13. Untersuchung

710		720		730		740	
40	20	35	18	20	9	6	6
30	9	35	4	20	2	20	5
10	18	18	20	14	10	9	14
35	10	10	9	18	10	25	10
172		149		103		95	
21,5		18,6		12,9		11,9	
750		**760**		**770**		**780**	
8	15	12	20	20	11	10	12
15	3	12	5	18	10	17	4
12	14	11	12	12	18	12	12
25	10	12	5	15	12	20	13
102		89		116		100	
12,8		11,1		14,5		12,5	
790		**800**		**820**		**840**	
7	20	6	18	11	13	10	25
12	12	13	4	10	10	15	6
12	9	13	6	15	10	12	12
17	20	17	15	10	7	15	7
109		89		86		102	
13,6		11,2		10,8		12,8	
860		**880**		**900**		**920**	
11	23	20	25	35	30	12	25
20	3	20	9	20	15	25	11
12	14	22	13	12	13	20	9
12	12	12	15	15	15	9	13
107		136		155		124	
13,4		17,0		19,4		15,5	
940		**960**		**980**		**1000**	
18	9	10	25	30	25	20	20
30	13	30	20	20	15	30	10
20	12	20	12	12	13	18	12
10	16	20	12	15	10	25	14
128		149		140		149	
16,0		18,6		17,5		18,6	
1050		**1100**		**1150**		**1200**	
15	23	>60	25				
27	>20	40	>30				
>25	>20	>40	>45				
>20	>20	>40	>40				

Meßergebnisse der 13. Untersuchung

Casotta 2.12.35 ♂ 24;11 1 3.11.60 16^{50}-17^{40} Wechselkraft + Schrittweg 2,00 p 30 mV/cm	50 3 1 – – 3 1 – – 8 2,0 2,6	100 3 1 – – 2 1 – – 7 1,8 2,2	150 2 1 – – 3 2 – – 8 2,0 2,4	68
200 4 2 – – 4 2 – – 12 3,0 3,5	250 6 5 0,5 0,5 4 2 – – 17 1 4,2 0,2 4,8 0,057	300 5 1 0,5 – 5 2 – – 13 0,5 3,2 0,1 3,6 0,024	350 12 8 1 0,5 7 3 0,5 – 30 2 7,5 0,5 8,2 0,10	
400 12 8 1 0,5 18 4 0,5 – 42 2 10,5 0,5 11,1 0,089	450 12 8 1 0,5 10 4 0,5 – 34 2 8,5 0,5 0,079	500 10 4 0,5 – 12 4 0,5 – 30 1 7,5 0,2 0,028	550 8 5 0,5 – 12 5 1 0,5 30 2 7,5 0,5 0,064	
600 8 5 1 0,5 9 2 1 0,5 24 3 6,0 0,8 0,094	610 10 4 1 0,5 12 5 1 0,5 31 3 7,8 0,8 0,093	620 12 5 1 0,5 8 3 1 0,5 28 3 7,0 0,8 0,092	630 12 2 1 – 10 5 1 0,5 29 2,5 7,2 0,6 0,068	
640 8 3 1 – 10 4 1 0,5 25 2,5 6,2 0,6 0,066	650 15 8 1 0,5 10 5 1 0,5 38 3 9,5 0,8 0,088	660 8 6 1 1 12 8 1 1 34 4 8,5 1,0 0,11	670 12 8 2 1 16 10 2 1 46 6 11,5 1,5 0,16	
680 12 10 2 1 20 12 3 2 54 8 13,5 2,0 0,21	690 11 10 2 1 16 12 4 3 49 10 12,2 2,5 0,26	700 22 6 2 1 22 15 4 3 65 10 16,2 2,5 0,25		

Meßergebnisse der 68. Untersuchung

710		720		730		740	
11	6	12	8	18	8	12	5
1	1	1	-	2	1	2	1
22	15	20	10	12	8	8	6
2	2	3	2	3	2	3	2
54	6	50	6	46	8	31	8
13,5	1,5	12,5	1,5	11,5	2,0	7,8	2,0
	0,15		0,15		0,19		0,19

750		760		770		780	
16	4	18	9	20	8	12	6
2	0,5	2	1	2	1	2	1
18	14	20	12	22	12	20	15
3	2	3	2	3	2	3	3
52	7,5	59	8	62	8	53	9
13,0	1,9	14,8	2,0	15,5	2,0	13,2	2,2
	0,18		0,19		0,18		0,20

790		800		850		900	
16	8	12	7	10	6	16	10
2	1	2	1	2	2	4	3
25	20	12	8	25	12	12	6
3	3	4	3	5	4	8	5
69	9	39	10	53	13	44	20
17,2	2,2	9,8	2,5	13,2	3,2	11,0	5,0
	0,20		0,22		0,27		0,39

950		1000		1050		1100	
12	9	22	8	12	10	13	8
6	5	8	5	7	5	7	5
10	12	15	10	20	12	25	15
8	6	8	6	12	8	15	8
43	25	55	27	54	32	61	35
10,8	6,2	13,8	6,8	13,5	8,0	15,2	8,8
	0,46		0,48		0,54		0,57

1150		1200		1250		1300	
20	8	40	32	30	25	30	20
10	3	10	8	13	9	14	7
30	18	45	28	>80			
16	9	20	13	>22			
76	38	145	51				
19,0	9,5	36,2	12,8				
	0,59		0,76				

Meßergebnisse der 68. Untersuchung

Casotta 2.12.35 ♂ 24;11 L1 7.11.60 10^{50}-11^{50} Wechselkraft + Schwingweg 200µ 30 mV/cm	50 5 – 3 – 4 – 1 – 13 – 3,2 4,2	100 3 – 2 – 2 – 1 – 8 – 2,0 2,4	150 4 – 3 – 70 4 – 2 – 13 – 3,2 3,8
200 5 – 2 – 6 – 3 – 16 – 4,0 4,6	250 6 – 3 – 6 – 3 – 18 – 4,5 5,1	300 7 – 4 – 8 – 4 – 23 – 5,8 6,5	350 12 – 8 – 6 – 2 – 28 – 7,0 7,6
400 14 8 1 0,5 11 4 1 – 37 2,5 9,2 0,6 9,7 0,11	450 13 6 1 0,5 10 2 1 – 31 2,5 7,8 0,6 0,095	500 12 2 1 – 10 4 1 – 28 2 7,0 0,5 0,071	550 20 12 2 1 12 5 1 1 49 5 12,2 1,2 0,15
600 17 7 2 1 10 6 2 1 40 6 10,0 1,5 0,18	610 18 11 2 1 12 6 2 1 47 6 11,8 1,5 0,17	620 17 11 2 1 11 6 2 0,5 45 5,5 11,2 1,4 0,16	630 18 11 2 2 12 6 2 1 47 7 11,8 1,8 0,20
640 14 8 2 1,5 10 6 1 1 38 5,5 9,5 1,4 0,16	650 14 14 2 2 14 10 2 1 52 7 13,0 1,8 0,20	660 16 12 3 2 14 11 2 1 53 8 13,2 2,0 0,21	670 15 9 3 2 14 12 2 2 50 9 12,5 2,2 0,23
680 14 9 3 2 12 7 2 1 42 8 10,5 2,0 0,21	690 14 10 3 2 12 7 2 1 43 8 10,8 2,0 0,21	700 14 9 3 2 14 9 2 1 46 8 11,5 2,0 0,2	

Meßergebnisse der 70. Untersuchung

710		720		730		740	
14	9	14	8	14	10	14	8
3	2	2	1	2	1	2	1
12	11	15	12	16	12	14	13
2	2	2	2	2	2	2	2
46	9	49	7	52	7	49	7
11,5	2,2	12,2	1,8	13,0	1,8	12,2	1,8
	0,22		0,18		0,18		0,17
750		**760**		**770**		**780**	
16	12	16	13	20	11	13	10
2	2	2	2	2	2	2	2
16	12	22	14	18	16	23	15
2	2	3	2	3	2	3	2
56	8	65	9	65	9	61	9
14,0	2,0	16,2	2,2	16,2	2,2	15,2	2,2
	0,19		0,21		0,20		0,20
790		**800**		**850**		**900**	
15	9	17	12	18	12	22	14
2	2	3	2	3	2	2	2
22	20	22	20	32	22	50	35
3	2	3	2	3	3	3	3
66	9	71	10	84	11	121	10
16,5	2,2	17,8	2,5	21,0	2,8	30,2	2,5
	0,20		0,22		0,23		0,20
950		**1000**		**1050**		**1100**	
35	26	28	22	36	25	45	30
3	2	4	3	7	5	8	6
58	45	56	48	45	32	58	38
5	4	7	5	8	6	10	7
164	14	154	19	138	26	171	31
41,0	3,5	38,5	4,8	34,5	6,5	42,8	7,8
	0,26		0,34		0,44		0,50
1150		**1200**		**1250**		**1300**	
55	45	85	45	60	40	85	65
7	4	8	4	12	8	12	10
60	45	80	50	70	45	120	100
9	6	6	3	14	10	13	12
205	26	260	21	215	44	370	47
51,2	6,5	65,0	5,2	53,8	11,0	92,5	11,8
	0,40		0,31		0,62		0,64

Meßergebnisse der 70. Untersuchung

$7,3 \left[\frac{p\ mV}{mV\ mm}\right]$ $(= E E_1 \frac{1}{V})$ zu multiplizieren. Da es sich als günstig für die Auswertung erweist, die Wechselkraft in mm-Ausschlag anzugeben, erfolgt die Angabe in p an der Ordinate der graphischen Darstellungen, während alle Berechnungen der Wechselkraft in mm-Ausschlag ausgeführt werden. Die Schwingwege werden ebenfalls in mm-Ausschlag am Oszillographen (maximal ± 10% Ableseungenauigkeit) abgelesen und aufgeschrieben. Für jede einzelne Frequenz wird der Mittelwert aus den einzelnen Meßwerten berechnet, der dann mit $\frac{70,9}{f}$ multipliziert den Schwingweg in μ ergibt. Siehe Blätter auf den Seiten 28-35. Im linken oberen Feld sind die Angaben über den Probanden, die Meßzeit, die angewandte Vorkraft und die Empfindlichkeit des Oszillographen notiert. In den übrigen Feldern ist links oben die Frequenz eingetragen, bei der untersucht wurde. Darunter stehen die Wechselkraftmeßwerte mit ansteigender, rechts daneben die mit abfallender Amplitude. Unter dem Strich sind die Summe der Meßwerte, der Mittelwert und u. U. der korrigierte Wert (Frequenzabhängigkeit der Anzeige) angegeben. Auf den Seiten 32-35 befindet sich rechts unterhalb jedes Wechselkraftmeßwertes der dazugehörige Schwingwegmeßwert und unter dem Strich links für die Wechselkraft, rechts für den Schwingweg Summe, Mittelwert und u. U. korrigierter Mittelwert. Die Mittelwerte der Wechselkraft- und Schwingwegmessungen bei den verschiedenen Frequenzen sind in den Tabellen auf den Seiten 57-63 zusammengestellt.

e) Auswertung der Meßergebnisse und Befunde

1. Gleichwertigkeit der Einzelmessungen

Wie aus den Blättern Seite 28-35 zu ersehen ist, streuen die Meßwerte beträchtlich. Die Werte für die Messungen mit ansteigender Amplitude sind im allgemeinen höher als die für die Messungen mit fallender Amplitude. Die Extreme verhalten sich wie 1:2 bis maximal 1:12, durchschnittlich etwa wie 1:4. Der Mittelwert der Streuungskoeffizienten für die einzelnen Frequenzen für beide Untersuchungen zusammen beträgt $\overline{V} = 45$.

Es ist zu untersuchen, ob die einzelnen Messungen als gleichwertig anzusehen sind. Dazu sind 10 Erstuntersuchungen an +1 und 1+ nach der Reihenfolge der einzelnen Messungen mit steigender Amplitude in der Tabelle Seite 37 für 50 Hz, 250 Hz, 450 Hz und 650 Hz zusammengestellt. Sowohl die Mittelwerte M als auch die Standardabweichungen s bzw. die Streuungskoeffizienten V zeigen ein uneinheitliches Verhalten. Ein Lerneffekt kommt nicht in Frage, denn die Mittelwerte der ersten Messungen sind mit einer Ausnahme (3. Messung bei 50 Hz) stets die kleinsten. Da die Mittelwerte im allgemeinen mit jeder folgenden Messung größer werden, ist zu untersuchen, ob ein Ermüdungseffekt vorhanden ist. Der größte Unterschied besteht zwischen der 1. und 9. Messung bei 250 Hz. Der errechnete t-Wert,

x	50 Hz Messung 1.	3.	5.	7.	9.	250 Hz Messung 1.	3.	5.	7.	9.	450 Hz Messung 1.	3.	5.	7.	9.	650 Hz Messung 1.	3.	5.	7.	9.			
1	6	5	3	3	5	3				1	1 1				1								
2	1	4	3	3	3	1	1	2			1			1	1								
3	1		1	1		3	1	1	4	2	2	1	1	1	1	1				1			
4	1		2	2	1	1	4	3		1		1		1	2								
5	1	1	1		1		2	1	4	3	2		4	1	1	3			1				
6						1	2	1	2		1	3		1	1	1	2	1	1	1			
7				1		1		1		1	1	1		2	1	1			1				
8								1		1	1	1		1		1	1	1	2	1			
9										1	1		1		2					1			
10														1						1			
11											1		1			1		1	1	1			
12														1			2	1					
13																	1			1			
14																1	1		1				
15											1									3			
16															1				1				
17																1			1	1			
18														1			1						
19																			2				
20											1					1	1						
25																1	1	2					
30																		1		1			
M =	2,0					3,1					4,9					10,9					13,2	6,4	48
s =	1,4					2,0					2,5					6,9					11,8	5,6	46
V =	71					64					51					63					16,7	7,5	45
																					12,0	6,4	53
																					10,9	6,9	63
																					7,4	4,0	55
																					7,0	4,3	62
																					7,0	5,1	73
																					6,7	3,8	57
																					4,9	2,5	51
																					5,0	2,3	46
																					4,4	1,2	27
																					4,5	1,9	42
																					4,3	1,2	28
																					3,1	2,0	64
																					2,0	1,4	67
																					2,7	1,8	66
																					2,5	1,4	54
																					1,8	1,3	65
																					2,0	1,4	71

Häufigkeitstabelle von Meßwerten, Mittelwerte x, Standardabweichungen und Streuungskoeffizienten der 1., 3., 5., 7. und 9. Messung von 10 erstmalig untersuchten +1 und 1+

$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sigma_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}} = \frac{\text{Mittelwertsdifferenz}}{\text{Standardfehler}} = \frac{1,9}{1,016} = 1,87$, ist für eine Verläßlichkeit auf dem 5%-Niveau statistisch nicht signifikant. Da alle anderen Mittelwertsunterschiede kleiner sind als der durchgerechnete, können alle Meßwerte einer Frequenz und eines Zahnes einer Versuchsperson als gleichwertig angesehen werden und daraus Mittelwerte gebildet werden. Damit ist auch die Zusammenfassung der Meßwerte zu den Mittelwerten in den Tabellen gerechtfertigt.

2. Auswertung für einen Zahn

In die graphische Darstellung der Abb. 10 sind die Mittelwerte (dicke ausgezogene und geschrichelte Linie) der zwei Untersuchungen von den Seiten 28-31, sowie die Minimal- und Maximalwerte (untere und obere dünn ausgezogene Linie) eingetragen. Es erweist sich als praktisch, die Ordinate, auf der die Wechselkräfte aufgetragen werden, logarithmisch zu teilen, um die Schwankungen der Kurven in jedem Bereich deutlich zur Darstellung zu bringen. Die Mittelwertskurven überschneiden sich mehrmals und sind in Anbetracht der großen Streuung als

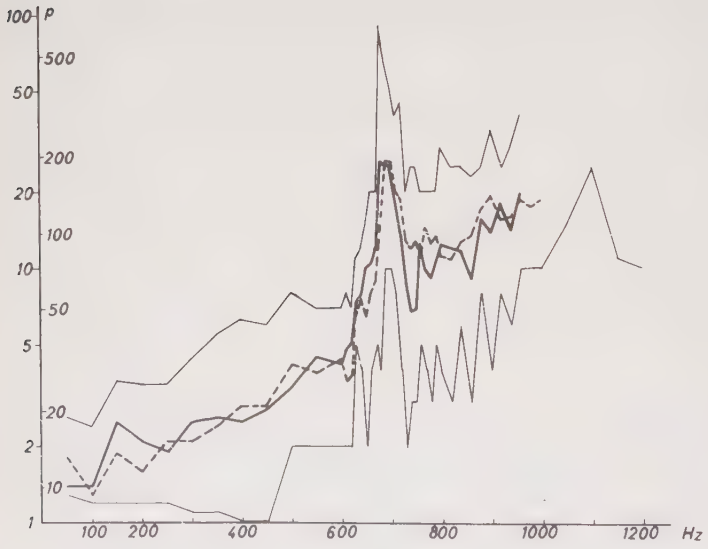


Abb. 10 Wechselkraftschwelle eines 1+
——— Mittelwert 1. Messung
– – – – " 2. "
——— (obere Kurve) Maximalwerte
——— (untere ") Maximalwerte

gleichwertig anzusehen. Die Tendenz der Kurve ist steigend, mit wachsender Frequenz wird die notwendige Wechselkraft ebenfalls größer. Auffallend ist der Gipfel bei 700 Hz, der uneinheitlich bei den verschiedenen Versuchspersonen auftritt. Wenn er auftritt, ist er exakt bei 700 Hz ± 20 Hz. Zur Klärung dieser eigenartigen Erscheinung sind bei einer Reihe von Zähnen die Stromstärken gemessen worden, die zur Anregung des Schwingungserregers bei den Schwellenmessungen notwendig sind. Abb. 11 zeigt den Verlauf der mA-Kurve von vier +1 und 1+. Der Verlauf ist glatt, so daß daraus keine Schlüsse für die Besonderheit zu ziehen sind.

Abb. 11 Zur Erregung bei der Wechselkraftschwelle notwendige Stromstärken gemessen an 4 +1 und 1+

3. Einfluß der Konzentration

Wie stark die Meßergebnisse von der Konzentration und Einstellung der Versuchsperson zu den Messungen abhängig sind, soll an einem anderen Beispiel erläutert werden (Abb. 12). Es war ausgemacht, daß der Proband sich für 3 Stunden zur Verfügung stellt. Nach einer 3/4 Stunde, als 4 Meßreihen ohne Besonderheiten durchgeführt waren, erklärte er während der 5. (Abb. 12, bei "↓"), er müsse jetzt nach Hause. Die letzten Werte steigen auf das Mehrfache des Mittelwerts aus den ersten 4 Messungen an und, auch als er zur Fortsetzung überredet worden

war, liegen die folgenden nur noch in einigen Fällen beim Mittelwert. In dem Augenblick, wo der Wille zur Mitarbeit fehlt, läßt die Konzentration nach, und die Meßergebnisse streuen noch breiter. Gegensätzliche Untersuchungen, bei denen die Versuchspersonen besonders zur Konzentration herausgefordert werden, zeigen keine Verminderung der Streuung. Der Versuchsperson wird während der Untersuchung bei einer Meßreihe gesagt, die Amplitude steige besonders steil an und sie solle sofort das Einsetzen des Vibrierens anzeigen, damit eine Beschädigung des Zahnes auf jeden Fall vermieden wird. Tatsächlich wird aber an der Einstellung der Apparatur nichts verändert. Die so gewonnenen Meßwerte liegen innerhalb des üblichen Streuungsbereiches.

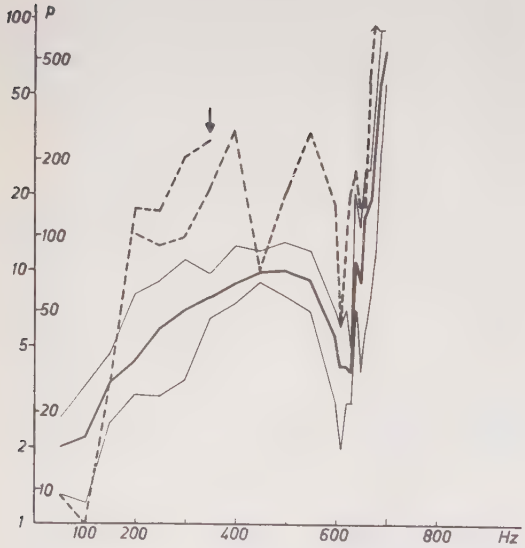


Abb. 12 Wechselkraftschwelle eines 1+
——— Mittelwert
——— Maximal- und Minimalwerte
– – – – 5. Meßreihe (Nachlassen der Konzentration)

4. Wiederholungsmessungen

In Abb. 13 sind 4 Kurven dargestellt, die alle von Messungen an einem Zahn stammen (1+). Die Intensitätsschwelle wurde morgens zwischen 8.30 und 10.00 Uhr und abends zwischen 18.30 und 20.00 Uhr bestimmt. Nach 2 Wochen wurden beide Messungen wiederholt. Die ausgezogene Kurven stammen von den Messungen am Morgen, die gestrichelten von denen am Abend. Die Kurven überschneiden sich häufig. Der mittlere Streuungskoeffizient der Mittelwerte beträgt $\overline{V} = 31$. Besonders unter Berücksichtigung der Streuung ist eine Abhängigkeit von der Tageszeit nicht nachweisbar. Grund zu dieser Untersuchung war die Feststellung Mühlemanns (23), daß die Zahnbeweglichkeit von der Tageszeit abhängig ist.

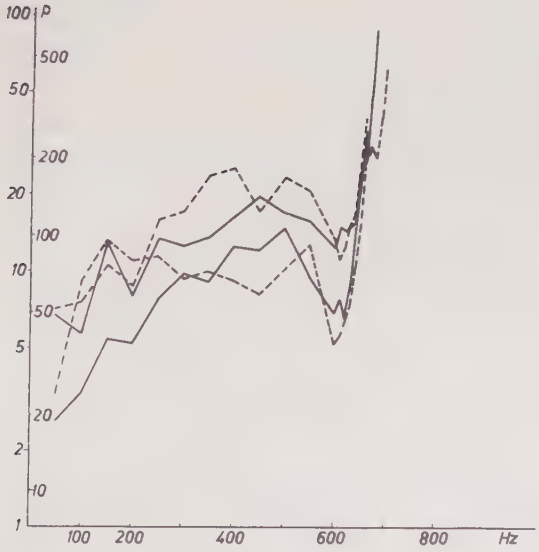


Abb. 13 Wechselkraftschwelle eines 1+
——— Mittelwerte von Messungen zwischen 8.30-10.00 Uhr
– – – – " " " zwischen 18.30-20.00 Uhr

5. Verschiedene Vorkräfte

Abb. 14 zeigt die Kurven von zwei Eckzähnen. Die obere Kurve (strichvierfachpunktiert) stammt von einem, die anderen 4 von dem anderen Eckzahn. Letzterer wurde bei verschiedenen Vorkräften untersucht. Die beiden ausgezogenen Linien sind zwei Mittelwertskurven mit 200 p Vorkraft, die gestrichelte ist eine Mittelwertskurve mit 50 p Vorkraft und die strichdoppelpunktierte eine mit 400 p Vorkraft. Eine bedeutsame Abhängigkeit der Intensitätsschwelle von der Vorkraft besteht sicher nicht. Das bestätigte sich an den Untersuchungen an einem weiteren Zahn (+1). Die Kurven liegen unter Berücksichtigung der Streuung zu dicht beieinander und schneiden sich außerdem häufig. Die interindividuelle Abweichung der Schwellenkurven der beiden Eckzähne um etwa das 5fache voneinander ist dagegen eindrucksvoll.

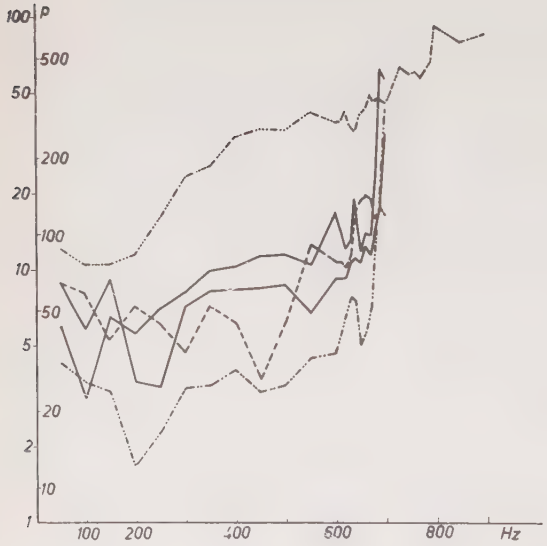


Abb. 14 Wechselkraftschwellen (Mittelwerte) von
3+ —·····—·····—200 p Vorkraft
3+ ——————200 p Vorkraft
— — — — — 50 p "
—··—·—·· 400 p "

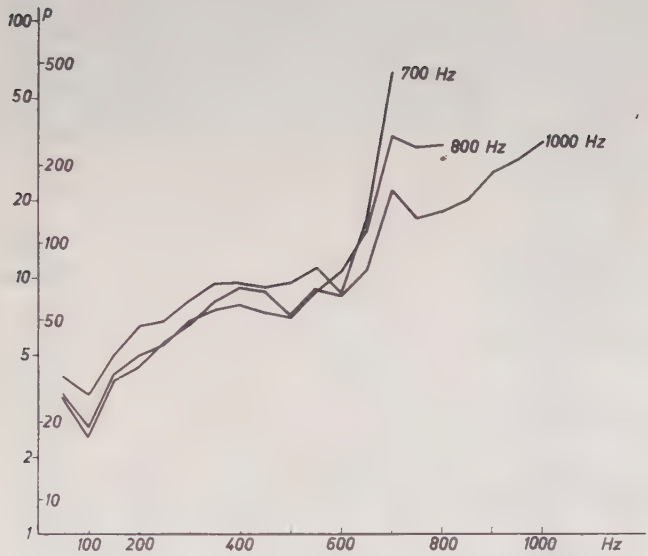


Abb. 15 Wechselkraftschwellen von +1 und 1+
700 Hz 36 Fälle
800 Hz 19 "
1000 Hz 8 "

6. Zusammenfassung der Wechselkraftmessungen an +1 und 1+

Die Belastungsgrenze des Schwingungserregers macht häufig Messungen über 700 Hz hinaus unmöglich. Obere, mittlere Schneidezähne konnten in 8 Fällen bis 1000 Hz und in 19 Fällen (unter Einschluß der Fälle bis 1000 Hz) bis 800 Hz untersucht werden. Die Mittelwertskurven der Mittelwerte dieser Fälle sowie die Zusammenfassung von 36 +1 und 1+, die sich bis 700 Hz verfolgen ließen, zeigt Abb. 15. Die Kurven steigen an. Mit zunehmender Frequenz muß die für die Schwelle notwendige Wechselkraft immer größer werden. Im allgemeinen liegen die Mittelwerte der Zähne, bei denen sich die Schwelle bis 800 Hz bzw. 1000 Hz verfolgen läßt, niedriger als diejenigen der Zähne, die bis 700 Hz untersucht werden konnten.

Die Häufigkeitsverteilung der Schwellenmittelwerte aller 55 +1 und 1+ für die verschiedenen Frequenzen zeigt Abb. 16 als Histrogramm (= Stabdiagramm). Auf der Ordinate sind die Häufigkeiten angegeben, auf der logarithmisch geteilten Abszisse die Wechselkräfte in mm-Ausschlag. Die Werte sind aus der Tabelle Seite 57 entnommen. Bei dieser

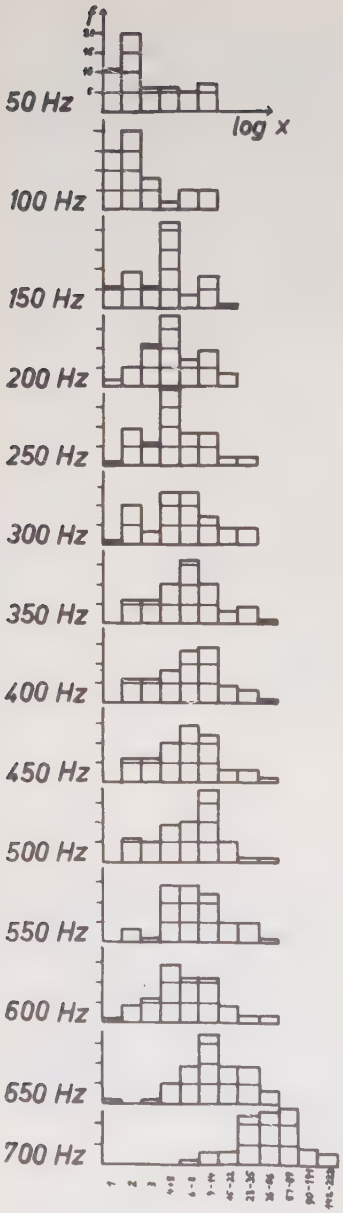


Abb. 16 Häufigkeits-diagramm der Wechsel-kraft-Schwellenmittel-werte von 55 +1 und 1+

Darstellungsweise erhält man angenähert Normalverteilungen. In Abb. 17 sind der Mittelwert x, der Minimal- und Maximalwert, x_{min} und x_{max}, sowie die Standardabweichung eingetragen. Das Überschneiden der Kurve der Standardabweichung mit der der Minima und das Nichtüberschneiden der Kurve der Standardabweichung mit der der Maxima zeigen die an sich einseitige Verteilung zu den kleineren Werten. Aus der Kurve läßt sich entnehmen, daß mit steigender Frequenz die Wechselkraft immer größer werden muß, um die Intensitätsschwelle zu erreichen.

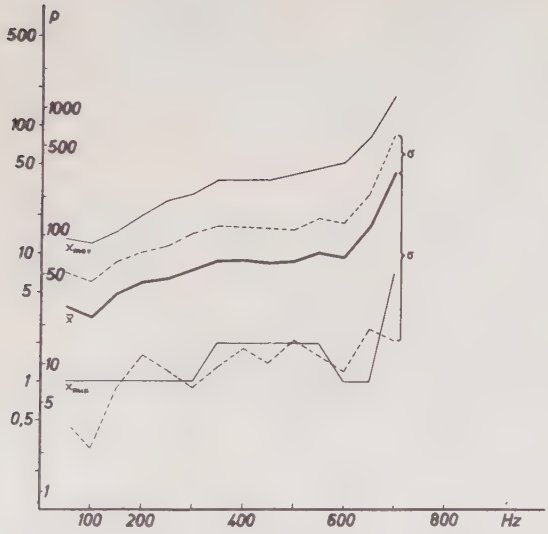


Abb. 17 Wechselkraftschwelle von 55 +1 und 1+
——— Mittelwert
——— Minimal- und Maximalwert
– – – – Standardabweichung

7. Schwingwege

Eine Schwingweguntersuchung an einem +1 mit Wiederholungsuntersuchung nach vier Tagen (1. Untersuchung nachm., 2. Untersuchung vorm.) wird mit der dazugehörigen Wechselkraftuntersuchung in Abb. 18 verglichen. Die oberen 4 Kurven beziehen sich auf die Wechselkraft, die unteren 4 auf den Schwingweg. Entsprechend Abb. 10 bedeuten die dick ausgezogenen (1. Untersuchung) und die gestrichelten (2. Untersuchung) Linien die Mittelwertskurven. Die Minimal- und

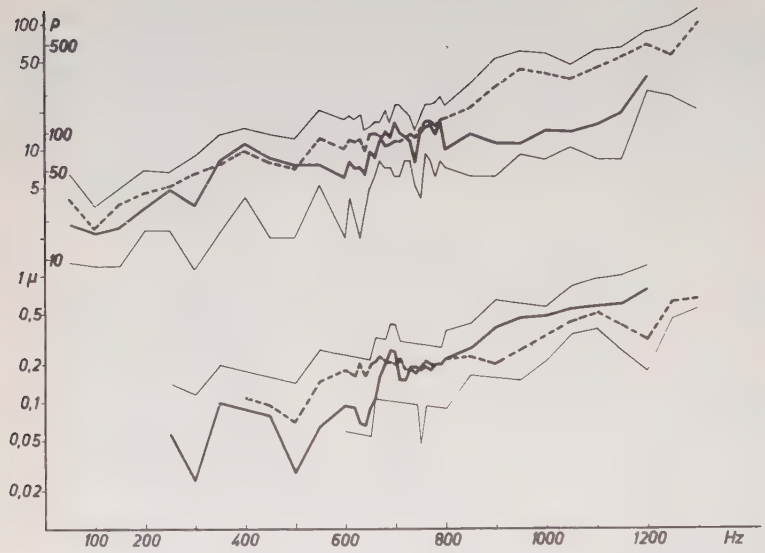


Abb. 18 Wechselkraftschwelle (obere Kurven) und dazugehörige Schwingwegschwelle (untere Kurven) eines +1

——————— Mittelwert 1. Messung
– – – – – – " 2. "
———·———·——— Minimal- und Maximalwerte

Maximalwerte sind als untere und obere dünn ausgezogene Kurve dargestellt. Die Originalmeßwerte sind aus den Seiten 32-35 zu ersehen. Aus der graphischen Darstellung kann entnommen werden, daß sowohl Wechselkraft als auch Schwingweg bei der Intensitätsschwelle mit der Frequenz zunehmen. Die Schwingwege im unteren Frequenzbereich sind wegen der Kleinheit der Wege ($< 0,5$ mm Ausschlag auf dem Leuchtschirm) mit dieser Versuchsapparatur nicht meßbar. Die Unregelmäßigkeiten in der Kurve sind auf die große Streuung der Meßwerte zurückzuführen. Bei diesen beiden Untersuchungen ist kein Gipfel für die Wechselkraft bei 700 Hz aufgetreten.

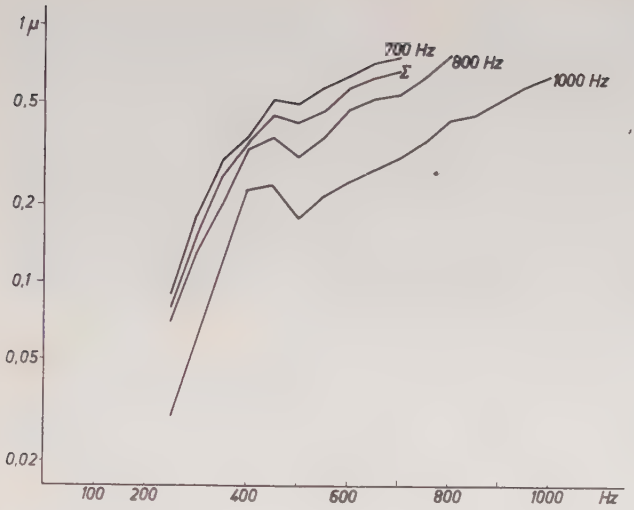


Abb. 19 Schwingwegschwelle von +1 und 1+
1000 Hz 6 Fälle
800 Hz 11 "
700 Hz 14 "
Σ 25 "

8. Zusammenfassung von Schwingwegmessungen an +1 und 1+

Eine Zusammenstellung der Mittelwertskurven von Schwingwegmittelwerten wird in Abb. 19 gezeigt. Die unterste Kurve ist eine Zusammenfassung von 6 +1 und 1+, deren Intensitätsschwelle sich bis 1000 Hz verfolgen läßt, die zweite Kurve eine Zusammenfassung von 11 +1 und 1+ mit ihrer Intensitätsschwelle bis 800 Hz (einschließlich der 6 +1 und 1+ bis 1000 Hz), die vierte Kurve eine Zusammenfassung von 14 +1 und 1+ bis 700 Hz, die dritte eine Zusammenfassung aller 25 +1 und 1+. Danach nimmt der Schwingweg, der notwendig ist, um die Intensitätsschwelle zu erreichen, etwa linear mit der Frequenz zu. Bei 700 Hz tritt bei keiner Schwingweguntersuchung ein Gipfel auf.

9. Untersuchungen an anderen Zähnen

Die Intensitätsschwelle liegt bei den übrigen untersuchten Frontzähnen in der gleichen Größenordnung. Unterschiede im Kurvenverlauf sind nicht feststellbar (Abb. 10, 13, 14, 18 und 21). Von den 11 untersuchten seitlichen Schneidezähnen (Abb. 20, durchgezogene Linie) hat einer eine so hohe Intensitätsschwelle, daß seine Kurve gesondert eingezeichnet werden muß (Abb. 20, punktierte Linie), weil seine Schwelle sich nur bis 550 Hz verfolgen läßt. Die Versuchsperson gibt auch an, daß ihr Hautabschürfungen, andere Verletzungen, sowie das Bohren und Schleifen an ihren Zähnen kaum Schmerzen bereiten. Außerdem sind noch die Kurven von 3 unteren mittleren Schneidezähnen (strichpunktierte Linie) und von 3 seitlichen unteren Schneidezähnen (strichdoppelpunktierte Linie) eingetragen.

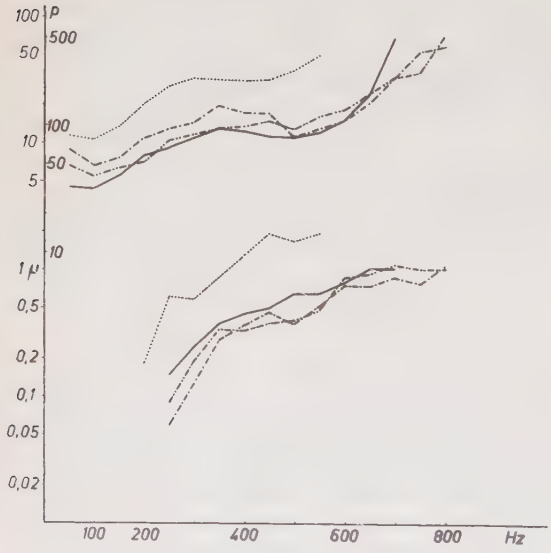


Abb. 20 Wechselkraftschwellen (obere Kurven) und Schwingwegschwellen (untere Kurven)
——————10 +2 und 2+
. . . . . 1 2+
– . – . – . – . – 3 -1 und 1-
– – – . . – – – – 3 -2 und 2-

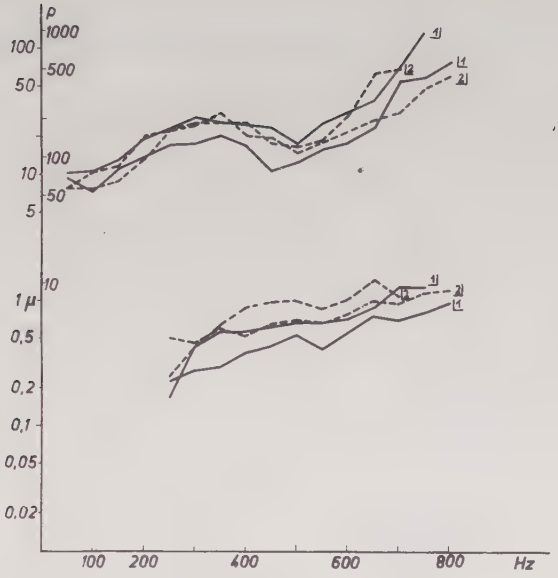


Abb. 21 Wechselkraftschwelle (obere Kurven) und Schwingwegschwelle (untere Kurven) bei einer oberen Front einer Versuchsperson

10. Schwellenbestimmung an 4 Frontzähnen einer Versuchsperson

Wenn bei den zusammenfassenden Kurven keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Frontzähnen zu erkennen sind, könnte jedoch bei der einzelnen Versuchsperson ein unterschiedliches Verhalten in der Schwelle festzustellen sein. Abb. 21 zeigt die Schwellenkurven für die Wechselkraft und den Schwingweg von 2+, 1+, +1 und +2 eines Probanden. Die Kurven decken sich. Die Schwellen liegen verhältnismäßig hoch. Auffallend ist der ähnliche Verlauf der Wechselkraftkurven. Es läßt sich an Hand der Schwellenkurven nicht entscheiden, welche Kurven zu den mittleren und welche zu den seitlichen Schneidezähnen gehören.

III. Diskussion

a) Korrektur des 700 Hz Gipfels der Wechselkraftschwelle

Der eigentümliche Gipfel der Wechselkraftkurven bei 700 Hz ± 20 Hz ist sehr wahrscheinlich auf eine Fehlanzeige zurückzuführen. Wie aus den Stromstärkemessungen (Abb. 11) zu entnehmen ist, geht die erhöhte Anzeige nicht auf eine größere Stromstärke zurück. Die Annahme seitlicher Biegeschwingungen des Stößels läßt sich auch nicht bestätigen, wie vergleichende Messungen mit verschieden langen und verschieden dicken Stößeln zeigten. Hierbei hätte wegen der verschiedenen Eigenfrequenzwerte der Stößel eine Verschiebung des 700 Hz Gipfels eintreten müssen. Es ist als sicher anzunehmen, daß keine so großen Wechselkräfte auf den Zahn einwirken, wie angezeigt werden. Würde es sich dennoch so verhalten und wäre es eine Eigenart der Zähne und der Versuchsperson, so würde der Gipfel nicht so konstant bei 700 Hz liegen. Außerdem führt der Zahn trotz erhöhter Wechselkraftanzeige tatsächlich keine entsprechenden, größeren Bewegungen aus, wie aus allen Schwingwegmessungen hervorgeht. Danach ist der Gipfel bei 700 Hz nicht zu berücksichtigen.

b) Streuung der Messungen

Bei der breiten intraindividuellen Streuung der Meßwerte ($\overline{V} = 45$, aus den Blättern Seite 28-31) ist zu berücksichtigen, daß es sich um Schwellenbestimmungen handelt, die naturgemäß sehr schwanken. Hinzu kommen noch die Anforderungen an die Körperkräfte, sich bis zu 2 Stunden ruhig auf dem Stuhl sitzend mit eingeschränkter Bewegungsmöglichkeit auf die kaum spürbaren, schwellennahen Empfindungen des Vibrierens zu konzentrieren. Aus Selbstversuchen und den Angaben der Versuchspersonen ist zu entnehmen, daß es trotz aller Konzentration schwierig zu beurteilen ist, ob ein Vibrieren spürbar ist oder nicht. Übereinstimmend sagen die Probanden, daß das Abfallen der Amplitude und Verschwinden der Vibrationsempfindung einfacher zu beurteilen sind als das Anwachsen der Schwingungen. Das entspricht den Feststellungen Keidels (16, 19). Für die wiederholte Schwellenbestimmung wird bei Goodfellow (11) eine Schwankungsbreite von ± 5 dB angegeben. Der mittlere Streuungskoeffizient der 4 Kurven der Abb. 13 beträgt $\overline{V} = 31$. Rechnet man diesen Wert zum Vergleich in dB um, so erhält man ± 2,4 dB.

$$(U = 20 \log \frac{N_1}{N_2} \text{ dB} \quad ; \quad U = 20 \log \frac{100}{131} =$$

$$= \pm 20\ (2{,}00 - 2{,}12) = \pm 20\ (-0{,}12) = \pm 2{,}4 \text{ dB})$$

Der Unterschied zwischen größtem und kleinstem Mittelwert verhält sich im Mittel wie 1 : 2,2, das entspricht ± 6,8 dB.

$$(U = \pm 20\ (\log 1 - \log 2{,}2) = \pm 20\ (0 - 0{,}34) = \pm 6{,}8 \text{ dB}).$$

Eine Übereinstimmung in der Größenordnung und mit den Angaben von Keidel (16) ist vorhanden.

Groß ist die interindividuelle Streuung. Sie beträgt nach der Tabelle von Seite 57 im Durchschnitt für die Streuungskoeffizienten der Wechselkraftmittelwerte $\overline{V}$ = 85. Es besteht eine gute Übereinstimmung mit den Angaben von Keidel (16), daß die interindividuelle Streuung in einem Bereich von 1 bis 2 Zehnerpotenzen liegt. Bei der grossen, individuell bedingten Streuung haben die Meßfehler, die durch die Anzeigeungenauigkeit (± 10%) und Ableseungenauigkeit (± 10%) bedingt sind, wenig Einfluß auf die Ergebnisse. Die Schwankungen der Vorkraft können ganz unberücksichtigt bleiben, da sie die Meßwerte nicht verändern.

Eine unterschiedliche Schwelle für die verschiedenen Frontzähne ist nicht nachweisbar (Abb. 21). Sollte sie vorhanden sein, wird sie vollkommen von der intra- und interindividuellen Streuung verdeckt. Es wäre zu untersuchen, ob eine größere Schwellenzunahme der Wechselkraft bei eventuell gleichem Schwingweg im Seitenzahnbereich zu verzeichnen ist. Die Vermutung stützt sich auf die Untersuchungen von v. Skramlik (31), der eine Zunahme der Kraftschwelle bei den Seitenzähnen feststellte, Sie ist auf eine Abhängigkeit von der Anzahl der Wurzeln und von der Periodontalfläche zurückzuführen. Allerdings sind Vibrationsuntersuchen an Molaren sehr schwierig. Der Schwingungserreger kann wegen der Wange nur von lingual bzw. palatinal, evtl. noch von occlusal an den Zahn herangebracht werden. Da der Schwingungserreger nicht innerhalb der Mundhöhle untergebracht werden kann, müßten die Wechselkräfte über einen sehr langen Stift dem Zahn zugeführt werden. Unter Umständen müßte der Stößel auch noch abgewinkelt werden, um ihn senkrecht zur Zahnachse zu stellen. Sicher würden dabei große und schwer meßbare Schwingungsverluste auftreten.

c) Einfluß des Gehörs

Durch den gleichzeitigen Schalleindruck, der bei höheren Frequenzen sehr kräftig ist, kann eine so starke Verdeckung eintreten, daß es im Zusammenhang mit der Konzentration und der Dauer der Untersuchungen zu einer größeren Streuung kommt, als wenn der Vibrationsreizort fernab vom Ohr liegt. Eine Ausschaltung des Gehörs durch andere akustische Reize erscheint nicht ratsam. Zu einer Verdeckung des vom Schwingungserreger über die gute Knochenleitung ans Ohr herangeführten Tons mit einem Ton ähnlicher oder anderer Frequenz wird eine unangenehm kräftige Lautstärke notwendig sein. Wegen der nun noch größeren Ablenkung sind schlechtere Meßergebnisse zu erwarten. Eventuell könnten Untersuchungen an tauben Versuchspersonen bessere Ergebnisse liefern, weil hierbei störende Einflüsse des Gehörs ausgeschaltet sind und nur noch die der Konzentration in den Meßergebnissen erscheinen. Andererseits kommen die Schwellenbestimmungen mit dem gleichzeitigen Schalleindruck den tatsächlichen Gegebenheiten beim Bohren und Schleifen am nächsten.

d) Vergleiche mit

1. Schwellenbestimmungen an anderen Reizorten

Trotz der großen intra- und interindividuellen Streuung läßt sich ein Bereich angeben, innerhalb dessen die Intensitätsschwelle liegt. In Abb. 22 wird die gefundene Schwellenkurve solchen anderer Reizorte gegenübergestellt. Die Mittelwertskurve von 25 untersuchten oberen mittleren Schneidezähnen liegt im Bereich der Empfindlichkeit der Finger. Die Minimalwerte liegen bis zu einer Zehnerpotenz darunter. Danach sind die Zähne unter Umständen empfindlicher als die Finger, ziemlich sicher scheint das für den Bereich oberhalb von 800 Hz (siehe Abb. 18) zu gelten. Andere Reizorte wie Stirn, Wade, Tibiafläche u. a. haben eine um eine Zehnerpotenz und mehr höherliegende Schwelle als der Finger.

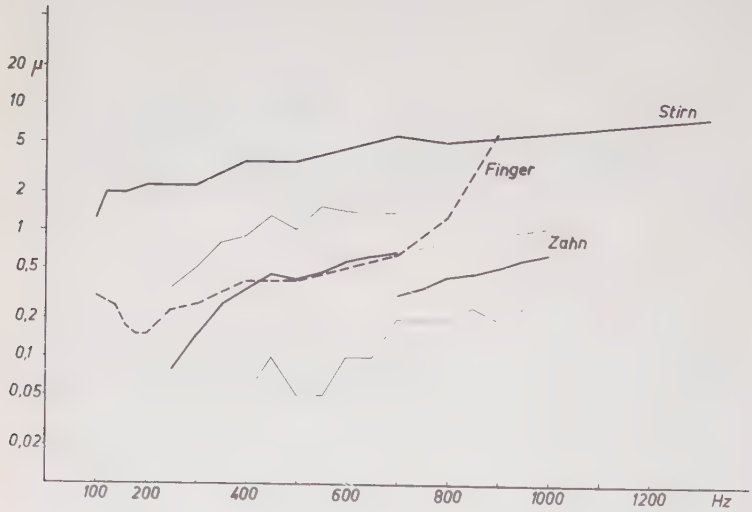


Abb. 22 Schwingwegschwelle verschiedener Reizorte

2. Bestimmungen der oberen Frequenzgrenze an Zähnen

Entsprechend dem Hörfeld, das durch die obere und untere Grenzfrequenz (20 und 20 000 Hz), die Intensitätsschwelle (= Hörschwelle) und die Schmerzschwelle begrenzt ist, ist ein Vibrationsfeld denkbar. Der Amplitude nach wird es von der Intensitätsschwelle und der Schmerzschwelle eingehüllt. Eine untere Grenzfrequenz kann wegen des kontinuierlichen Übergangs in das Druckempfinden (19) nicht bestimmt werden. Die obere Grenzfrequenz ist fließend wie beim Gehör. Entsprechend dem Verlauf der Intensitätsschwelle sind zur Bestimmung der oberen Grenzfrequenz größere Kräfte notwendig (30). Mit der hier verwendeten Apparatur wurde sicher in keinem Fall die obere Grenze erreicht. Da mit nur einer Ausnahme bei den eigenen Untersuchungen bis 700 Hz immer ein Reizerfolg zu verzeichnen war, sind die Angaben von Walsh und Symmons (33) über die obere Grenze zu niedrig. Vermutlich ist ihr Gerät nicht leistungsfähig genug, so daß sie fälschlicherweise 600 Hz als Mittelwert für die obere Grenze finden, weil sie infolge zu geringer Wechselkräfte darüber hinaus kein Vibrationsempfinden mehr auslösen können. Auch bei Walser (34), der als mittlere Grenze 1000 Hz angibt, geht aus seiner Arbeit nicht hervor, ob die begrenzte Leistungsfähigkeit des Gerätes nicht zu einer zu niedrigen oberen Grenze geführt hat. Es ist denkbar, daß bei höheren Frequenzen die Schwelle steil ansteigt und sehr große Wechselkräfte dazu notwendig sind. Unter Umständen fällt dann die Intensitätsschwelle mit der Schmerzschwelle zusammen. Mit einem genügend leistungsfähigen Schwingungsgeber müßten weitere Untersuchungen erfolgen, um den tatsächlichen Verlauf der Intensitätsschwelle bis zur oberen Grenze zu verfolgen. Wegen der guten Ankoppelung der Rezeptoren im Periodontium muß man sogar vermuten, daß die obere Grenze im Vergleich zu anderen Reizorten hoch liegt.

3. Schwingwege des Zahnes beim Bohren und Schleifen

Das Bohren und Schleifen mit den imperatorgelagerten Instrumenten ist deswegen weniger unangenehm, weil die hierbei auftretenden Schwingwege geringer gegenüber den einfach gelagerten Instrumenten sind. Das bedeutet, daß die Schwingwege näher zum Bereich der Vibrationsschwellenwerte liegen und deswegen weniger stark empfunden werden. Die Schwingwege beim Bohren und Schleifen liegen trotz Imperatorlagerung immer noch wenigstens um etwa eine Zehnerpotenz über der Intensitätsschwelle (Abb. 23). Im untersuchten Frequenzbereich wird also immer beim Bearbeiten der Zahnhartsubstanz ein Vibrationsempfinden vorhanden sein. Erst wenn es gelingt, die Schwingwege beim Bohren und Schleifen so klein zu machen, daß sie unterhalb der Intensitätsschwelle liegen, ist ein Vibrieren nicht mehr zu spüren. Damit fallen die Vibrationen dann als Schmerzursache aus, weil die Reize unterschwellig sind. Da die beim Bohren und Schleifen auftretenden Schwingwege mit zunehmender Frequenz immer kleiner werden (Abb. 1) und wenn die steigende Tendenz der Schwingwegschwellenkurve über den untersuchten Frequenzbereich hinaus anhält

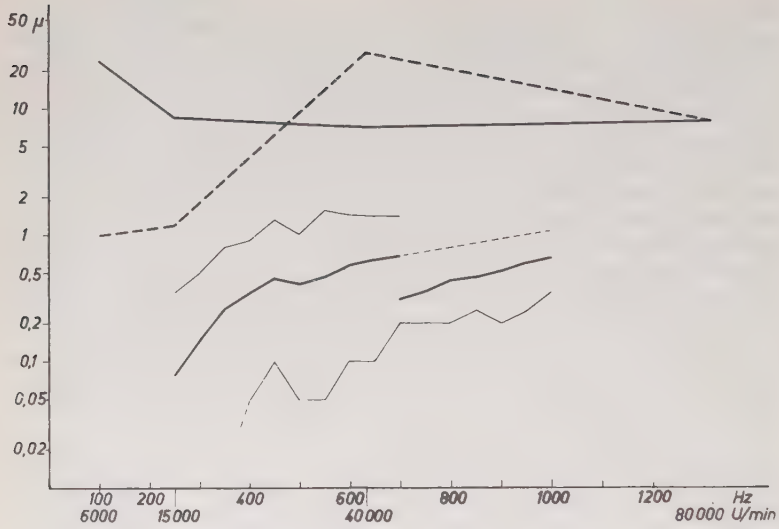


Abb. 23 Schwingwegschwelle (unten) und Schwingwege (oben) beim Bohren (————) und Schleifen (– – – –)

(Abb. 19), ist es möglich, daß sich beide Kurven bei den Frequenzen, die den Umdrehungszahlen beim höchsttourigen Bohren und Schleifen entsprechen, schneiden. Damit wären die Reize unterschwellig und eine Begründung dafür gegeben, daß höhere Drehzahlen beim Bearbeiten der Zahnhartsubstanzen weniger unangenehm sind.

e) Zentrale Verarbeitung

Beim Bohren und Schleifen kommt es zu einem komplexen Empfinden. Visuell wird das Hantieren mit dem Instrument wahrgenommen. Beim Ansetzen des Instruments an den Zahn nimmt der Patient, besonders wenn er ängstlich ist, einen Schmerzeindruck dadurch vorweg, daß er das Vibrieren am Zahn und das Summen im Kopf mit dem Schmerz gleichsetzt, ohne daß es tatsächlich weh tut. Der Schmerz wird erwartet, und die Unannehmlichkeit der Vibrationen und des Schalleindrucks werden als Bestätigung, als Schmerz genommen. Daß geringere Vibrationen (= kleinere Schwingwege) tatsächlich das Bohren und Schleifen weniger unangenehm machen, hat sich mit der Einführung der imperatorgelagerten Instrumente bestätigt. Beim Bearbeiten der Zahnhartsubstanzen verspürt man bei den höchsten Umdrehungszahlen nur noch einen sehr lauten Ton im Kopf und am Zahn eine Berührung wie bei einer Wundfläche.

d) Klinische Hinweise

Da mit steigender Frequenz die Intensitätsschwelle immer höher und die Intensität des Vibrationsempfindens immer geringer wird, sollte man bestrebt sein, am Zahn mit hohen und höchsten Umdrehungszahlen zu arbeiten. Die durch die Vibrationen auftretenden Unannehmlichkeiten werden dadurch ausgeschlossen oder zumindest verringert. Weil die Stärke des Vibrationsempfindens nicht nur von der Frequenz sondern auch von der Amplitude (Schwingweg) abhängt, muß darauf geachtet werden, daß beim Bohren und Schleifen nur exakt gearbeitete, zentrisch laufende Instrumente benutzt werden. Ferner ist zu berücksichtigen, daß bei ein und demselben Instrument in Abhängigkeit von der Drehzahl bei bestimmten Frequenzen die auftretenden Schwingwege besonders groß sein können (Abb. 1). Bei diesen maximalen Schwingwegen ist das Bohren und Schleifen trotz erhöhter Umdrehungszahl unter Umständen unangenehmer als bei niedrigereren Drehzahlen. Bekannt ist diese Tatsache beim "Rattern" eines Rosen- oder Fissurenbohrers an einer Kavitätenwand. Arbeitet man mit verminderter Drehzahl weiter, ist die Behandlung für den Patienten weniger unangenehm.

Hingewiesen sei auch auf das unterschiedlich starke Vibrationsempfinden bei gleicher Drehzahl, wenn am Zahn mit gleich großem Schlagpolierer, Rosenbohrer, Finierer und Kugelpolierer gearbeitet wird. Die diamantierten Instrumente sind zwischen die Finierer und Kugelpolierer einzuordnen. Die Diamantkristalle ragen in großer Zahl ein wenig aus dem Befestigungsmetall heraus und stoßen beim Schleifen den Zahn wie die Schneiden eines Bohrers an. Je mehr sich das Instrument der glatten Kugeloberfläche nähert, desto weniger stehen die angreifenden Kanten vor und desto geringer wird damit der Zahn zum Schwingen angeregt. Außerdem kommt es noch durch die vermehrte Anzahl der Kanten zu einer Erhöhung der Frequenz, so daß auch dadurch das Vibrationsempfinden weniger kräftig wird.

C Zusammenfassung

Der menschliche Zahn ist ein schwingungsfähiger Körper. Beim Bohren und Schleifen bewegt er sich mit Frequenzen und Amplituden, die ihm vom Instrument im Hand- bzw. Winkelstück aufgezwungen werden. Die Frequenz ist durch die Umdrehungszahl pro Minute und bei Bohrern im Drehzahlbereich bis 20 000 U/min zusätzlich durch die Anzahl der Schneiden gegeben. Die Amplitude ist abhängig von der Exzentrizität des sich drehenden Instruments, dem Lagerspiel des Hand- bzw. Winkelstücks und der Drehzahl.

Infolge seiner Steife überträgt der Zahn die ihm aufgezwungenen Schwingungen auf das Periodontium. Die darinliegenden Mechanorezeptoren werden gereizt und geben in die zentripetalen Nervenfasern Erregungsimpulse ab. Die Entladungen im Nerven erfolgen synchron mit der Reizfrequenz. Je höher die Frequenz ist, desto stärker wird die Adaptation. Die Adaptation ist ein Abfall der Impulsfrequenz in der einzelnen

Nervenfaser, der nach kurzer Reizdauer einsetzt. Am ganzen Nervenstrang kommt das Adaptieren, da immer mehrere Rezeptoren gereizt werden, in einem Amplitudenabfall zum Ausdruck. Als Alternieren wird die Übertragung eines Bruchteils der Reizfrequenz bezeichnet. Es treten dabei Synchronisationsraten von 1: 1 bis 1: 5 auf. Das Alternieren tritt bei Reizung der einzelnen Nervenfaser oberhalb ihrer Refraktärzeit ein. Der ganze Nervenstrang kann dabei wieder die Gesamtfrequenz übertragen, so daß es möglich ist Freuenzen oberhalb der Refraktärzeit des Nerven zu rezipieren (gemessen 8000 Hz).

Die eigenen Untersuchungen wurden mit einem elektromagnetischen Schwingungserreger durchgeführt, der mit einer Vorkraft von 200 p an den Zahn drückt. Gemessen wurden die für die Intensitätsschwelle der Zähne notwendigen Wechselkräfte und die dabei auftretenden Schwingwege der Zähne. Es wurden klinisch gesunde, freistehende Frontzähne an 43 Studenten im Alter von 19;4 bis 33;0 Jahren untersucht. Es wurden an 55 +1 und 1+, 11 +2 und 2+, 2 +3 und 3+, 3 -1 und 1- und 3 -2 und 2- zusammen 12 000 Wechselkraft- und 3 500 Schwingwegmessungen durchgeführt. Wie bei den Untersuchungen anderer Autoren streuen die Meßergebnisse intraindividuell in den Grenzen von $1 \cdot 10^1$, interindividuell $5 \cdot 10^1$. Die Messungen sind stark von der Konzentration der Versuchspersonen abhängig, unabhängig sind sie von der Tageszeit, der Art des Frontzahnes und der Vorkraft (im Bereich von 50 bis 400 p). Es wurden Frequenzen im Bereich von 50 Hz bis 700 Hz, bei einigen Fällen bis 1000 Hz untersucht. Die hauptsächlichen, allgemein zu fassenden Ergebnisse sind:

1. Sowohl Wechselkraft als auch Schwingweg müssen mit wachsender Frequenz größer werden, um die Intensitätsschwelle zu erreichen.

2. Die Wechselkräfte bewegen sich im Bereich von 50 - 1000 Hz in den Grenzen von 10 p bis 1000 p, die Schwingwege von 0,05 μ (und weniger) bis 2 μ.

3. Die Schwingwegschwellenkurve steht im untersuchten Bereich von 250 - 1000 Hz in etwa linearer Abhängigkeit von der Frequenz.

4. Die Zähne sind verglichen mit anderen Reizorten gegenüber Vibrationen genauso empfindlich wie die Fingerkuppe. Die Zähne und die Finger sind für Vibrationen am empfindlichsten. Andere Reizorte haben eine um wenigstens eine Zehnerpotenz höher liegende Schwelle.

5. Die Schwingwege für die Intensitätsschwelle im Bereich bis 1000 Hz liegen um wenigstens eine Zehnerpotenz niedriger als diejenigen, die beim Bohren und Schleifen auftreten.

Mit einer anderen Apparatur könnten die Schwingwege im unteren Frequenzbereich bis 250 Hz und die Wechselkräfte und Schwingwege oberhalb von 1000 Hz bzw. 700 Hz bis zu der Frequenz, die der oberen Drehzahlgrenze der zahnärztlichen Bohrmaschinen entspricht, untersucht werden, um diesen Überblick zu vervollständigen.

Hz \ x	+	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	32	37	42	47	52	57	62	67	72	77	82	87	92	107	122	157	177
50	11	20	6	51		2	2	1		3	1	2	1																																	
100	15	20	8	2		1	1	3	2		2	1																																	
150	6	9	6	14	8	1	1	1		2	1	1	3	1	1																														
200	2	5	11	10	8	3	3	1	1	3	2	1	1	1			1			2																								
250	1	9	6	10	9	5	1	2	1		3	2	1	1		1	1							1		1																		
300	1	10	3	7	6	9	3	1	3	1		1	2				2	2						2			1	1																	
350		6	6	5	4	7	2	7	3	3	2		1	1	1				1		1			1		2		1			1													
400		6	6	5	3	8	1	4	4	3	1	2	3	1		1	1			1		1	1		1	1					1												
450		6	6	7	3	4	4	6	3	5	2	1		1			1			2			1	1						1	1												
500		6	5	5	4	4	2	4	5	7	1	1	3	1	1		1	1	1	1			1									1											
550		3	1	8	6	4	2	8	6	3	1	1	1		1	2				1	1			1		1	1			2			1									
600	1	4	6	9	5	6	2	3	5	1		4		1				1	1	1		1						1	1			1	1									
650	1		1	1	4	6		3	1	4	3	5	1	3	1	2	1	3		1	1			3	3	1	1			1		2		1				1				
700							1		1		1	1				1					2			2	1	2	2	2	1	2	4	1	2	6	1	5	1	1	1	3	2	1	2	1	1	2

Hz	$\bar{x}$	σ^2	σ	V
50	3,8	10,7	3,3	87
100	3,2	8,4	2,9	91
150	4,8	14,9	3,9	97
200	6,0	19,3	4,4	74
250	6,4	27,0	5,2	81
300	7,6	45,0	6,7	88
350	8,8	56,0	7,5	85
400	8,9	50,5	7,1	80
450	8,6	52,0	7,2	84
500	8,8	45,4	6,7	77
550	10,3	76,0	8,7	84
600	9,4	67,5	8,2	87
650	16,2	184	13,6	84
700	43,2	1685	41,1	95

$\bar{V} = 85,4$

Häufigkeitstabelle von Meßwertmittelwerten der Wechselkraft von allen 55 +1 und 1+ bis 700 Hz, sowie die dazugehörigen Mittelwerte, Varianzen, Standardabweichungen und Streuungskoeffizienten ($\bar{x}, \sigma^2, \sigma, V$) für die einzelnen Frequenzen und der Mittelwert aller Streuungskoeffizienten ($\bar{V}$)

Hz \ x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	32	37	42	47	52	57	62	67	72	77	82	87	92	107	122	157	177	M
50	7	13	4	2	1	2	2	1		1		2	1											1		1																			4,1
100	8	12	7	2		1		1	2		2	1																																		3,5
150	3	4	3	10	7	1	1	1		1	1		3		1																															5,0
200	1	3	8	3	6	2	3	1	1	2	2		1				1			2																										6,5
250	1	4	6	5	5	5		1	1		2	1	1	1		1								1		1																				6,8
300		6	3	5	3	6	2		2	1		1	2				1							2				1	1																8,2
350		4	2	5	4	3	1	4	3	1	1		1	1	1									1		2		1			1														9,5
400		2	3	5	3	6		3	3	1		1	2	1		1				1			1		1	1				1														9,6
450		3	3	6	3	2	3	3	2	3	1	1					1			2				1					1	1														9,2
500		3	3	2	2	3	1	3	4	5	1		2	1	1		1	1	1				1							1		1												9,6
550		2		3	5	4		4	5	3	1		1		1	1					1	1		1			1			1			1											11,0
600		3	4	6	5	4	1	3	4			1		1								1						1	1			1												8,7
650					3	4		2	1	1	3	4		2	1	1	1	2			1	1		1	2	1	1			1		2		1										16,8
700									1															2		1		2	1	1	2	1	1	3	1	5	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	64,2

Häufigkeitstabelle von Meßwertmittelwerten der Wechselkraft von 36 +1 und 1+ bis 700 Hz

Hz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	32	37	42	47	52	57	62	67	72	77	82	87	107	112	117
50	4	7	2	3						2	1																																
100	7	8	1				1	2																																			
150	3	5	3	4	1					1		1		1																													
200	1	2	3	7	2	1				1		1		1																													
250		5		5	4		1	1			1	1					1																										
300	1	4		2	3	3	1	1	1								1	2																								
350		2	4			4	1	3		2	1								1		1																						
400		4	3			2	1	1	1	2	1	1	1				1					1																				
450		3	3	1		2	1	3	1	2	1			1									1																			
500		3	2	3	2	1	1	1	1	2		1	1							1																						
550		1	1	5	1		2	4	1			1				1										1			1													
600	1	1	2	3		2	1		1	1		3						1	1	1																						
650	1		1	1	1	2		1		3		1	1	1		1		1						2	1																	
700							1				1	1				1					2				1	1	2			1	2		1	3					1			
750							1			1			2	1	1					1		1	1	1				1			2	3			1	1				1			
800									1	2	1			1		1		2			1				1				3	1	2			1					1			1

Hz	$\bar{x}$	σ^2	σ	V
50	3,5	9,6	3,1	88
100	2,6	5,2	2,3	88
150	4,2	13,2	3,6	87
200	5,0	11,0	3,3	67
250	5,5	15,1	3,9	70
300	6,7	27,2	5,2	78
350	7,5	25,8	5,1	68
400	7,8	29,9	5,5	70
450	7,3	25,2	5,0	69
500	7,0	20,8	4,6	59
550	8,9	56,3	7,5	84
600	10,7	127	11,3	105
650	15,3	295	17,2	112
700	36,4	560	23,6	65
750	32,9	605	24,6	75
800	33,4	725	26,9	81

Häufigkeitstabelle von Meßwertmittelwerten der Wechselkraft von 19 +1 und 1+ bis 800 Hz, sowie die dazu gehörigen Mittelwerte, Varianzen, Standardabweichungen und Streuungskoeffizienten ($\bar{x}$, σ^2, σ, V)

Hz \ x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	32	37	42	47	52	57	M
50	1	3	2	1						1																										3,4
100	3	4						1						1																						2,4
150	1	3	1	2																																4,0
200	1	1	1	1	2	1				1																										4,5
250		2		1	2		1	1			1																									5,6
300		2		1	1	1		1	1								1																			6,6
350		1	1				1	3		1									1																	8,1
400		1	2							2	1		1									1														9,2
450		1	1	1				2	1					1									1													8,9
500			1	2	1	1	1	1												1																7,2
550		1		2				2	1			1														1										9,1
600	1			2		1				1		2								1																8,6
650	1			1		1				1		1	1			1								1												10,8
700							1					1				1					1					1	1			1	1					22,2
750										1			2	1	1							1	1					1								17,2
800										1	2							2			1					1				1						18,4
850									1				2							1	2								1			1				20,4
900											1		1						1					1					2	1	1					26,3
950											1			1			1								1					1	2	1				29,5
1000														1		1			1										2	1			2		34,9

Häufigkeitstabelle von Meßwertmittelwerten
der Wechselkraft von 8 +1 und 1+ bis 1000 Hz

Hz \ x	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55/μ	$\bar{x}$	σ^2	σ	V
250	14	1	1	5		3		1																									0,08	0,0146	0,12	151
300	6	6	2		2	3	1	2		2	1																						0,15	0,0290	0,17	110
350	1	3	6	2	2	1	3		2		1	2	1				1																0,26	0,0425	0,21	80
400		1	5	3	1	3	1		2	3	1	1			1		1		2														0,35	0,0572	0,24	68
450			2	3	3	2			3	4		1	1	1		1			2	1						1							0,45	0,0815	0,29	63
500		2	1	4	1	2	1	2	3	2		1			1	1	1			1		2											0,42	0,0890	0,30	71
550		1	1	2	3	2		1	4	2	2		1	1					2			1	1								1		0,47	0,1290	0,36	74
600			1	2	2	3			3	1		3	1	2		1		1			1	1	1					1	1				0,58	0,1270	0,36	62
650			1	1	2	2	1	1	1		1	1		2	4	2			1		1				2		1	1					0,64	0,1430	0,38	59
700					3	2	2		1	1	2		1		2	3	1	1	1					1		2		2					0,68	0,1480	0,38	57

Hz \ x	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55/μ	$\bar{x}$
250	7			1	4	2																											0,09
300	1	5	1		1	2		2		2																							0,18
350		3	3			1	2		1			2	1				1																0,30
400		1	3	1		2	1			1		1			1		1		1														0,37
450				2	2	1			2	1		1		1		1			1	1						1							0,52
500				3		2	1		2	1					1	1				1		2											0,50
550			1		2	1		1	1	1	1		1	1					2			1									1		0,58
600				1		3			1			1	1	2		1					1	1	1						1				0,65
650				1		1	1	1				1			3	1			1		1				2		1						0,73
700					1	1	1			1	1		1			2		1	1					1		1		2					0,77

		795
V = 79,5		

Häufigkeitstabelle von Mittelwerten des Schwingwegs von allen 25 +1 und 1+ bis 700 Hz, sowie die dazugehörigen Mittelwerte ($\bar{x}$), Varianzen (σ^2), Standardabweichungen (σ), Streuungskoeffizienten (V) und der Mittelwert des Streuungskoeffizienten ($\bar{V}$) (oben) und Tabelle von 14 +1 und 1+ bis 700 Hz (unten)

x / Hz	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45 µ	$\bar{x}$
250		7	1		1			1																							0,07
300		5	1	1		1	1				1																				0,13
350		1		3	2	2		1		1	1																				0,20
400				2	2	1	1			2	1	1							1												0,33
450				2	1	1	1			1	3		1						1												0,37
500			2	1	1	1			2	1	1		1				1														0,31
550			1		2	1	1			3	1	1										1									0,37
600				1	1	2				2	1		2					1												1	0,48
650				1		2	1			1		1			2	1	1												1		0,53
700						2	1	1		1		1				2	1	1									1					0,55
750						2	1				1	1	1				1	1			1	1					1					0,65
800						2	1						1		1		1				1		1	1			1	1				0,79

Häufigkeitstabelle von Mittelwerten des Schwingwegs von 11 +1 und 1+ bis 800 Hz und die dazugehörigen Mittelwerte

Hz \ x	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20 µ	$\bar{x}$
250	4	1		1																						0,03
300	4		1			1																				0,06
350	1		2	1	2																					0,12
400			2	1	1				1	1																0,23
450			2	1	1					2																0,24
500		2	1	1				1	1																	0,18
550		1		2	1				2																	0,22
600			1	1	2				1	1																0,25
650			1		2	1			1		1															0,28
700					2	1	1		1		1															0,31
750					2	1				1	1	1														0,36
800					2	1						1		1			1									0,44
850						3							1	1		1										0,46
900					1		1		1			1					1		1							0,52
950						1		1		1									1			1				0,60
1000								1			2	1						1						1		0,66

Häufigkeitstabelle von Mittelwerten des Schwingwegs von 6 +1 und 1+ bis 1000 Hz und die dazugehörigen Mittelwerte

Literaturverzeichnis

1. Andreae, G., Eichner, K., und Rohrbach, Chr.: Messung der Eigenfrequenz menschlicher Zähne und ihre Vibrationen beim Bohren und Schleifen mit einem ansetzbaren, kleinen Induktionsschwingungsmesser. Zahnärztl. Rdsch., Berlin, 69, 49-56 (1960)

2. Békésy, G.v.,: Über die Vibrationsempfindung. Akust. Z., 4, 316-334 (1939)

3. derselbe: The neural terminations responding to stimulation of pressure and vibration. J. exper. Psychol., 26, 514-519 (1940)

4. Bethe, A., und Bergmann, G.v.: Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie. Springer, Berlin, 1926 Bd. 11, 107-111: Frey, M.v.: Tangoreceptoren des Menschen.

5. Echlin, F., und Fessard, A.: Synchronized impulse discharges from receptors in the deep tissues in response to a vibrating stimulus. J. Physiol., London, 93, 312-334 (1938)

6. Eichner, K.: Schleifen und Bohren in der konservierenden und prothetischen Zahnheilkunde - ein Überblick über neue Wege und Methoden. Zahnärztl. Rdsch., Berlin, 66, 149-156 (1957)

7. derselbe: Ergebnisse wissenschaftlicher Untersuchungen zum hoch- und höchsttourigen Bohren und Schleifen. Dtsch. zahnärztl. Zschr., 15, 192-209 (1960)

8. derselbe: Untersuchungen von Bohr- und Schleifvorgängen an Zahnhartsubstanzen mit Hilfe von kinematographischen Zeitdehnungsaufnahmen. Manuskript.

9. Gierke, H.E.v., Oestreicher, H.L., Franke, E.K., Parrack, H.O., und Wittern, W.W.v.: Physics of vibrations in living tissues. J. Appl. Physiol., Wash., 4, 886-900 (1952)

10. Gneupel, J.: Die Empfindlichkeit der Zähne gegenüber Druck. Med. Diss., Berlin, 1951

11. Goodfellow, L.D.: The stability of auditory and vibrotactile thresholds. J. Gen. Psychol., Worcester, 18, 49-55 (1938)

12. Henrysson, St., Haseloff, O.W., Hoffmann, H.J.: Kleines Lehrbuch der Statistik. de Gruyter, Berlin 1960

13. Hensel, H.: Sinnesempfindung in der Mundhöhle. Die Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Urban & Schwarzenberg, München und Berlin, 1, 447-466 (1958)

14. Ilg, V.K.: Untersuchungen über den Rundlauf zahnärztlicher Schleifscheiben. Dtsch. zähnärztl. Zschr., 8, 139-144 (1953)

15. Kantorowicz, A.: Handwörterbuch der gesamten Zahnheilkunde. Barth und Meusser, Leipzig und Berlin, 1931. Bd. III Häupel: Paradentium.

16. Keidel, W.-D.: Die Auflagedruck- und Ortsabhängigkeit der Vibrationsschwellen des Menschen. Pflügers Arch. Physiol., 256, 242-264 (1952)

17. derselbe und Schmitt, H.G.: Hautwellenlänge und dynamischer Scherelastizitätskoeffizient der menschlichen Körperoberfläche bei Vibrationen mit 50 Hz. Pflügers Arch. Physiol., 260, 274-291 (1955)

18. derselbe: Aktionspotentiale des N. dorsocutaneus bei niederfrequenten Vibrationen der Froschrükkenhaut. Pflügers Arch. Physiol., 260, 416-436 (1955)

19. derselbe: Vibrationsreception. Der Erschütterungssinn des Menschen. (Erlanger Forschungen. Reihe B. Naturwissenschaften. Bd. 2) Erlangen: Universitätsbund 1956, 154S.

20. Keller, H., und Kierse, H.: Die Erschütterung der Zähne und die Schleifleistung von Diamantbohrern bei verschiedenen Rotationsgeschwindigkeiten. Dtsch. zahnärztl. Zschr., 9, 519-527 (1954)

21. Laidlow, R.W., und Hamilton, M.A.: Thresholds of vibratory sensibility as determined by the pallesthesiometer. A study of sixty normal subjects. Bull. Neurol. Inst., N.Y., 6, 494-503 (1937)

22. Lerche, E.: Der Verdeckungseffekt im Tierexperiment. Pflügers Arch. Physiol., 255, 417-448 (1952)

23. Mühlemann, H.R.: Die physiologische und pathologische Zahnbeweglichkeit. Schweiz. Mschr. Zahnhk., 61, 1-67 (1951)

24. National Bureau of Standards: Die Wirkungsweise von Bohrern in Zeitlupen-Aufnahmen. Dtsch. zahnärztl. Zschr., 10, 1897-1898 (1955)

25. derselbe: Cuttung Properties of Dental Burs: Report. Dent. Digest, Pittsburgh, USA, 62, 114-115 (1956)

26. Pätzold, J., Behne, E.A., und Seegers, W.: Zur Turbinentechnik in der Zahnheilkunde (aus der Entwicklungsabteilung der Siemens-Reiniger-Werke A.G. Erlangen).
Zahnärztl. Welt und zahnärztl. Ref., Heidelberg, 60, 422-426 (1959)

27. Pfaffmann, C.: Afferent impulses from the teeth resulting from a vibratory stimulus.
J. Physiol., 97, 220-232 (1939)

28. Rubin, E.: Quelques experiences sur les rapports entre les domaines auditif et tactile vibratoire. (Einige Versuche über die Beziehungen zwischen dem Gehörsinn und dem taktilen Vibrationssinn).
J. psychol. norm. path., Paris, 35, 19-25 (1938)

29. Rebel, H.-H.: Bio-Prothetik und Werk-Prothetik.
Dtsch. zahnärztl. Zschr., 13, 1041-1051 (1958)

30. Skramlik, E.v.: Beiträge zur Phychophysiologie der Sinnesleistung. Psychophysiologie der Tastsinne. Teil 1 und 2. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1937

31. derselbe: Die Zähne als Vermittler von Empfindungen.
Dtsch. Stomat., 2, 326-335 (1952)

32. Walker, H.W.: Statistische Methoden für Psychologen und Pädagogen. Beltz, Weinheim-Berlin, 1954

33. Walsh, J.P., and Symmons, H.: Vibration Perception and Frequencies. N. Zealand Dent. J., Dunedin, 45, 106-114 (1949)

34. Walser, G.: Experimentell-physikalische Untersuchungen über das Bohren und Schleifen mit turbinengetriebenen Instrumenten bei höchsten Drehzahlen. Zahnärztl. Welt und zahnärztl. Ref., Heidelberg, 61, 107-111 (1960)

35. Weitz, J.: Vibratory sensitivity by local anesthesia.
J. Exper. Psychol., 25, 48-64 (1939)

36. derselbe: Vibratory sensitivity as a function of skin temperatur. J. Exper. Psychol., 28, 21-36 (1941)

37. Weski, O.: Röntgenologisch-anatomische Studien aus dem Gebiet der Kieferpathologie. (1. Forts.)
Vjschr. Zahnhk., Berlin, 38, 1-29 (1922)

38. Westphal, W.: Physik. Springer, Berlin, 14. und 15. Auflage, 1950

39. Zwirner, E.: Verwendungsmöglichkeiten des Kathodenstrahloscillographen zu Forschungszwecken in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde. Dtsch. zahnärztl. Zschr., 4, 794-806 (1949)

40. derselbe: Nachweis von Zahnbewegungen im Tierversuch. Dtsch. zahnärztl. Zschr., 6, 39-43 (1951)

Herrn Professor Harndt möchte ich für die Übertragung des Themas und seine großzügige Unterstützung, die er mir als Doktorvater gewährte, danken.

Ferner gilt mein Dank Herrn Dr.-Ing. Rohrbach und Herrn Dipl.-Ing. Andreae von der Bundesanstalt für Materialprüfung. Sie machten die Untersuchungen durch den Entwurf und die Herstellung des Schwingungserregers möglich. Herr Dipl.-Ing. Andreae stellte die Apparatur zusammen und beriet mich in technischen und physikalischen Fragen.

Ebenso schulde ich Herrn Doktor Eichner für seine Anregungen und seine hilfreiche Beratung und Unterstützung Dank.

Lebenslauf

Am 26. Mai 1933 wurde ich als Sohn des damaligen Studienassessors Dr. Reinhold Viohl und seiner Ehefrau Gertrud, geb. Lork, in Berlin-Köpenick geboren. Ab Ostern 1939 ging ich in Königs Wusterhausen zur Schule und bestand, durch den Krieg nach Hameln verschlagen, dort Ostern 1954 mein Abitur.

Im Sommersemester 1954 begann ich in Marburg / Lahn Zahnheilkunde zu studieren und legte nach 3 Semestern im Herbst 1955 meine zahnärztliche Vorprüfung ab. Mein klinisches Studium setzte ich an der Freien Universität in Berlin fort, wo ich während des Wintersemesters 1958/59 mein Staatsexamen bestand.

Seit Mai 1959 beschäftigte ich mich mit meiner Dissertation. Während dieser Zeit war ich von Juni 1959 bis März 1961 als wissenschaftlicher Hilfsassistent in der prothetischen Abteilung der Zahnklinik und außerdem von November 1959 bis April 1960 als Hospitant in der chirurgischen Abteilung tätig.